



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VLIV OČKOVÁNÍ A RYCHLOSTI OCHLAZOVÁNÍ NA
HODNOTU DAS U SLÉVÁRENSKÝCH SLITIN HLINÍKU**

EFFECT OF INOCULATION AND COOLING RATE ON THE DAS FOR ALUMINIUM FOUNDRY ALLOYS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Václav Dočekal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Kaňa, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Václav Dočekal**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Václav Kaňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vliv očkování a rychlosti ochlazování na hodnotu DAS u slévárenských slitin hliníku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hodnota DAS (dendrite arm spacing), tedy vzdálenost os dendritů, je jedním ze základních parametrů ovlivňujících mechanické vlastnosti hliníkových slitin. Nejvýraznější vliv na hodnotu DAS má rychlost tuhnutí. Očkování, tedy vnášení krystalizačních zárodků do taveniny, má také výrazný vliv na výsledné vlastnosti slitiny. V praxi se pak pro ovlivňování mechanických vlastností používá jak očkování, tak i změna rychlosti tuhnutí.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je z dostupných literárních zdrojů sestavit rešerši pojednávající o očkování a možnostech ovlivňování DAS u slévárenských slitin hliníku a provést jednoduchý experiment pro ověření vlivu očkování a rychlosti tuhnutí na DAS.

Seznam doporučené literatury:

ROUČKA, Jaromír. Metalurgie neželezných slitin. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6

CHO, Jae-Ik, Cheol-Woo KIM a Jae-Ik CHO. THE RELATIONSHIP BETWEEN DENDRITE ARM SPACING AND COOLING RATE OF Al-Si CASTING ALLOYS IN HIGH PRESSURE DIE CASTING. International Journal of Metalcasting [online]. American Foundry Society, 2014, 8(1): 49-55 [cit. 2015-10-16].

Encyklopedie hliníku. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, 700 s. ISBN 80-890-4188-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá vlivem očkovaní a rychlosti ochlazování na hodnotu DAS. Je tedy především zaměřena na vliv očkovaní a na vzniku dendritů u slévarenských slitiny hliníku. V druhé části práce je popsán experiment. V této experimentální části je zkoumán vliv očkovaní kombinace Ti a B. Zkoumán je také vliv rychlosti ochlazování na hodnotu DAS, které se dosáhlo různými způsoby lití. Tyto vlivy byly zkoumány na slitině hliníku-AlSi10Mg(a). Bylo zjištěno, že hodnotu DAS ovlivňuje rychlost ochlazování. Očkovaní nemá na tuto hodnotu vliv.

Klíčová slova

Očkovaní, DAS-vzdálenost sekundárních os dendritů, AlSi10Mg, slitiny hliníku, slévárnictví

ABSTRACT

This bachelor thesis deals influence of inoculation and rate of cooling on DAS value. The aim of this thesis is primarily the effect of inoculation and formation of dendrites in aluminium alloy. The second part of thesis describe experiment. In this experimental part, is research effect inoculation of combination Ti and B. The influence of the cooling rate on the DAS value, which has been achieved by various casting processes, has also been researched. These effects, was researched on aluminium alloy-AlSi10Mg(a). The DAS has been found to affect the rate of cooling. Inoculation does not affect this value.

Keywords

Inoculation, DAS-dendrite arm spacing, AlSi10Mg, aluminium alloy, foundry

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOČEKAL, V. *Vliv očkování a rychlosti ochlazování na hodnotu DAS u slévárenských slitin hliníku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 47 s.
Vedoucí bakalářské práce Ing. Václav Kaňa, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 26.5.2017

.....
Václav Dočekal

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Václavu Kaňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během mého studia.

OBSAH

ZADÁNÍ

ABSTRAKT

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

PODĚKOVÁNÍ

OBSAH

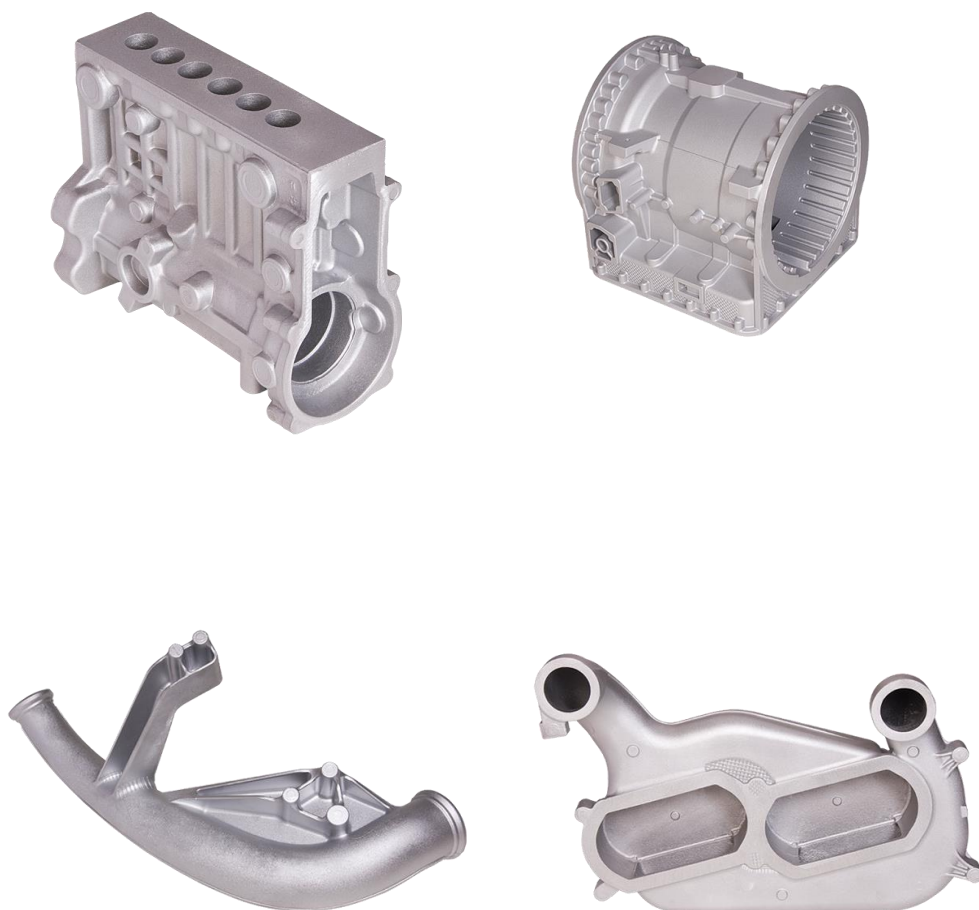
ÚVOD	10
1 HISTORIE HLINÍKU	11
2 SLÉVÁRENSKÉ SLITINY HLINÍKU	12
2.1 Slitiny Al-Si	12
2.1.1 Slitiny Al-Si-Cu	14
2.1.2 Slitiny Al-Si-Mg	14
2.2 Slitiny Al-Mg	15
2.3 Slitiny Al-Cu	16
2.4 Slitiny Al-Zn	17
3 TUHNUTÍ SLITIN HLINÍKU	18
3.1 Tuhnutí primární fáze $\alpha(\text{Al})$	18
3.1.1 Vznik dendritické struktury	18
3.1.2 Hodnota DAS	19
3.1.3 Vliv DAS na mechanické vlastnosti	20
3.1.4 Měření DAS	20
3.1.5 Růst primární fáze	21
3.2 Očkování slitin hliníku	22
3.2.1 Očkovací prostředky	23
3.2.2 Očkování titanem	23
3.2.3 Očkování bórem	24
3.2.4 Očkování kombinací titan a bór	24
3.2.5 Očkování dalšími prvky	25
3.3 Modifikace eutektika u slitin Al-Si	26
3.3.1 Vliv modifikace na vlastnosti hliníkových slitin	27
3.3.2 Modifikace slitin Al-Si sodíkem	27
3.3.3 Modifikace slitin Al-Si stronciem	28
3.3.4 Modifikování slitin Al-Si antimonem	29
3.3.5 Modifikace slitin Al-Si dalšími prvky	29
4 EXPERIMENT	30

4.1 Odlévání vzorků	31
4.2 Příprava metalografických vzorků	32
4.3 Měření hodnot DAS	37
4.3.1 Dean-Dixonův test (Q-test)	38
4.3.2 Grubbsův test	38
ZÁVĚRY	40
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	
SEZNAM OBRÁZKŮ	
SEZNAM TABULEK	

ÚVOD

Slitiny hliníku jsou využity v mnoha průmyslových odvětvích jako je: stavebnictví, potravinářství, klenotnictví, strojírenství, chemický průmysl, elektrotechnický a energetický průmysl atd. Hlavními oblastmi využití hliníku jsou dopravní průmysl (letadla, auta, lodě, vlaky, autobusy, kosmonautika).

Vzdálenost sekundárních os dendritů neboli hodnota DAS (dendrite arm spacing) ovlivňuje zejména mechanické vlastnosti výsledných slitin. Tuto hodnotu lze ovlivnit rychlostí ochlazování odlitku. Dle názorů autorů očkovaní nemá vliv na hodnotu DAS. Očkováním se ale zlepší obrobiteľnosť, sníží se pórovitosť, zlepší se kvalita povrchu po anodické oxidácii, sníží se sklon ke vzniku trhlin, zvýší se pevnosť, ťažnosť a vlastnosti po tepelném zpracovaní. Očkuje se pomocou titánu, bóru, kombinácií týchto prvků nebo i nestandardními prvky jako je skandium a fosfor [1].



Obr. 1 Příklady odlitků z hliníkových slitin [2]

1 HISTORIE HLINÍKU

Kvůli technické složitosti výroby se hliník a jeho slitiny začaly používat v nedávné historii. Technicky náročnější získání prvků a jejich slitin, které začalo ještě později je např. výroba hořčíku a titanu [1].

V roce 1808 Angličan H. Davy poprvé elektrochemicky připravil hliník, ale bohužel se mu nepodařilo jej oddělit z reakční směsi. O pár let později, roku 1825, Dán Hans Christian Oersted, který reakcí zředěného amalgamu draslíku s chloridem hlinitým poprvé izoloval znečištěný kov. Tuto metodu přípravy zlepšil německý chemik Friedrich Wöhler, který použil pro reakci draslík. Tato výroba hliníku byla velice drahá. Kov byl tak drahý, že byl v roce 1855 vystavován na pařížské výstavě vedle korunovačních klenotů v podobě tyče o hmotnosti 1 kg. Císař Ludvík Napoleon III. používal pro vysokou cenu hliníku pro státní návštěvy hliníkové přibory. Až v roce 1845 francouzský chemik Saint-Claire Deville vynalezl způsob, jak výrobu hliníku zlevnit. Pro zlevnění výroby použil k redukci místo drahého draslíku sodík. Tento francouzský chemik taktéž upravil označení hliník na dodnes všeobecně používaný název aluminium. Nezávisle na sobě se podařilo francouzskému metalurgovi Paulu Louisu Héroultovi a Američanu Charlesu Martinovi Hallovi v roce 1886 objevit metodu elektrolytické výroby hliníku z bauxitu v lázni roztaveného kryolitu. Metoda elektrolytické redukce hliníku nastartovala obrovský rozvoj průmyslové výroby hliníku a je používána dodnes [1,3,4].

První z příkladů toho, jak by měl být hliník zpracován, byla výroba sochy Erose na Piccadilly Circus v Londýně v roce 1893. V roce 1897 byl postaven kostel San Gioacchino v Římě, na kterém byla střecha pokryta hliníkovými plechy, které jsou dodnes ve výborném stavu. Což nám dokazuje výbornou odolnost vůči povětrnostním vlivům a dlouho životnost [5,6].



Obr. 2 Socha Erose [7]

Na počátku 20. století se projevují snahy o zvýšení pevností a tvrdostí hliníkových slitin tepelným zpracováním, což vedlo k objevení tzv. vytvrzování. K výraznému zlepšení mechanických vlastností vedlo objevení metody zjemnění eutektika Al-Si modifikací sodíkem v roce 1921. Rozšíření výroby a používání hliníkových slitin přinesly obě světové války, především pro stavbu letadel. Po 2. světové válce došlo k velkému nárůstu výroby hliníkových slitin, díky rozšíření technologie odlévání do kovových forem [1].

V současnosti se polovina celkové výroby hliníkových odlitků odlévá tlakovým litím. Druhá polovina se odlévá gravitačním a nízkotlakým litím. Pouze malá část odlitků jsou lité do pískových forem. Tlakově lité odlitky jsou nejvíce dodávány pro automobilový průmysl a dále jako odlitky pro elektrotechnický a spotřební průmysl [1].

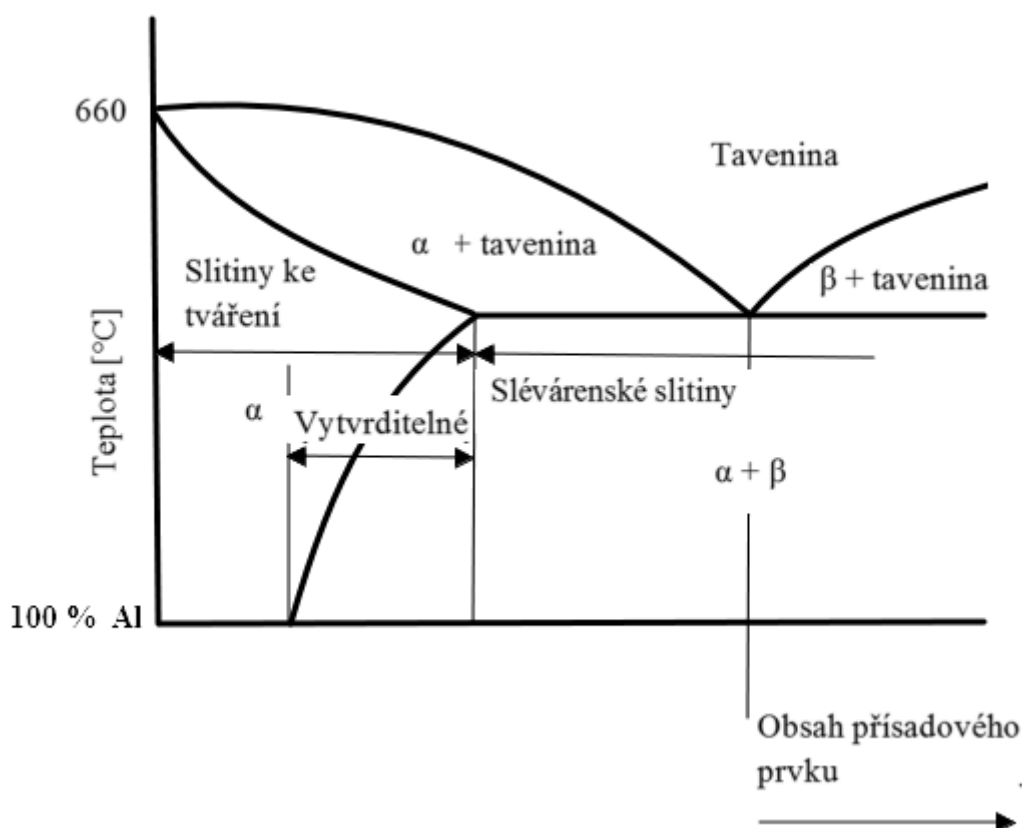
2 SLÉVÁRENSKÉ SLITINY HLINÍKU

Čistý hliník není pro své vlastnosti vhodný pro konstrukční účely, proto se pro výrobu používá ve formě slitin. Základním prvkem je tedy hliník a hlavní přísadové prvky jsou:

- slitiny Al-Si → siluminy
- slitiny Al-Cu → duralaluminium
- slitiny Al-Mg → hydronalium

Slitiny mohou obsahovat vedlejší přísadové prvky, které mohou zvýšit mechanické vlastnosti, zlepšit obrobitelnost atd. Dále ve slitině mohou být doprovodné prvky, což jsou prvky, které nejsou do slitiny přidávány záměrně. Při vyšší koncentraci mohou zhoršit mechanické a technologické vlastnosti. Označujeme je jako nečistoty [1].

Hlavní kritérium pro rozdělení slitin hliníku jsou hlavní přísadové prvky. Ty nám určují, zda se jedná o slitiny hliníku slévárenské nebo ke tváření. V porovnání se slitinami z jiných kovů mají slitiny hliníku nízkou teplotu tavení (660 °C), dobrou slévatelnost, malý interval krystalizace, možnost minimalizovat jediný rozpustný plyn v hliníku (vodík) [1].



Obr. 3 Binární diagram na bázi hliníku a přísadového prvku s rozdělením slitin hliníku [8]

2.1 Slitiny Al-Si

Slitiny hliníku a křemíku, které nazýváme siluminy, se řadí mezi nejvýznamnější slitiny hliníku. Je to především díky dobrým mechanickým vlastnostem při normálních, vysokých nebo nízkých teplotách. Dále pro jejich dobrou obrobitelnost, svařitelnost, zabíhavost, odolnost proti korozi, nízké smrštění a nízký sklon ke tvorbě trhlin a prasklin [9].

Podle binárního diagramu tvoří siluminy eutektický systém s omezenou rozpustností křemíku v hliníku. Při eutektické teplotě (577 °C) je to 1,65 % Si a s klesající teplotou se dále

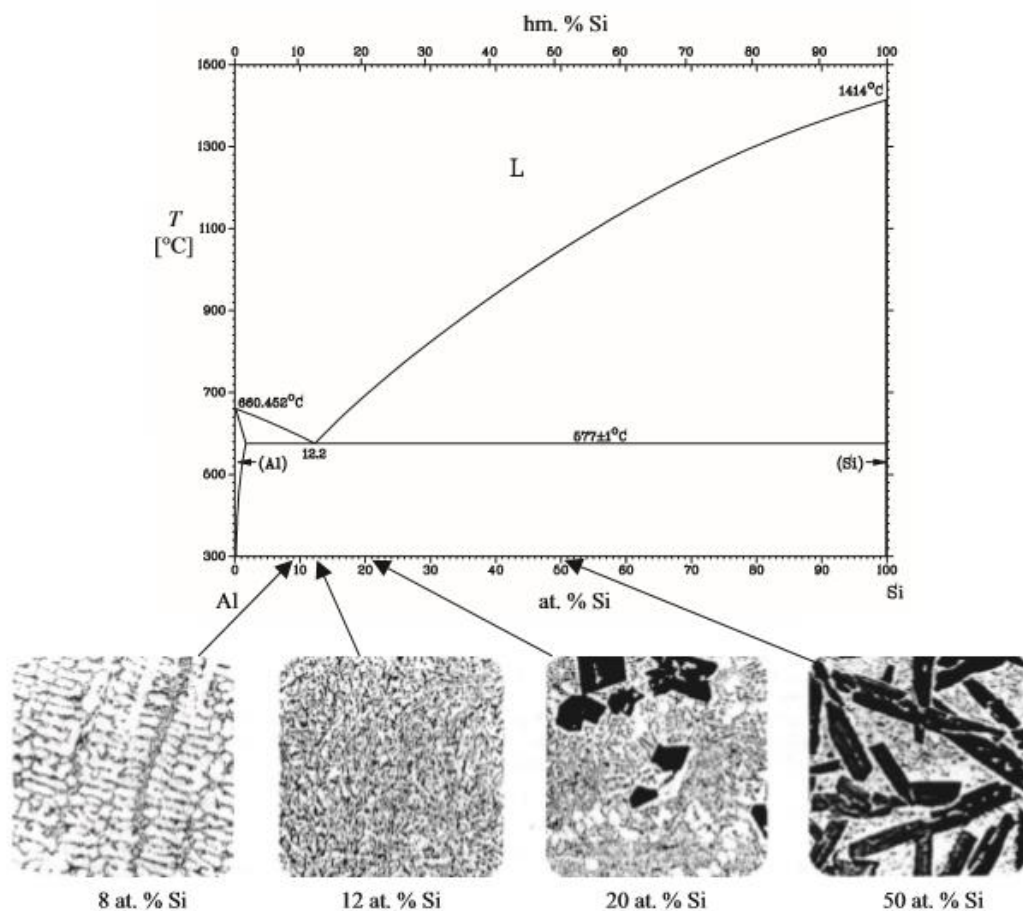
sníží. Ve slévarenských slitinách je ovšem obsah křemíku vždy vyšší, než je maximální rozpustnost v tuhém stavu roztoku $\alpha(\text{Al})$. A proto siluminy obsahují vždy eutektikum $\alpha(\text{Al})$ -Si. Eutektická koncentrace křemíku se pohybuje v různých zdrojích okolo 12,5 % [9,10].

Slitiny na bázi Al-Si se podle obsahu křemíku dělí na [1]:

- Podeutektické siluminy – obsahují více než 5 % Si, obvykle 7-11 % Si
- Eutektické – obsahují 11,5 – 13 % Si
- Nadeutektické – obvykle obsahují 14-17 % Si, v některých případech do 25 % Si

Proměnná rozpustnost křemíku v hliníku v závislosti na teplotě nám umožňuje zvýšit pevnostní charakteristiky těchto slitin tepelným zpracováním, které nazýváme vytvrzování. Z hlediska možnosti zpevnění tepelným zpracováním můžeme dělit siluminy na [9]:

- vytvrditelné
- nevytvrditelné



Obr. 4 Rovnovážný diagram Al-Si s obrázky mikrostruktur rozdílného obsahu Si [11]

2.1.1 Slitiny Al-Si-Cu

Největší využití našly tyto slitiny v automobilovém průmyslu pro odlévání pístů, spalovacích motorů a bloku motorů. Díky mědi mají tyto slitiny dobré slévárenské vlastnosti i dobrou obrobitelnost. Snižuje se výskyt staženin a při tuhnutí se zlepšuje nepropustnost odlitků [1].

Obsah mědi se pohybuje okolo 1-5 %, v závislosti na požadavky dané slitiny. Přítomnost mědi zvyšuje pevnost. Když se slitina rychle ochladí, dochází k samovolnému vytvrzování. Měď nám naopak snižuje odolnost proti korozi [12].

2.1.2 Slitiny Al-Si-Mg

Obsah hořčíku se pohybuje většinou 0,25-0,45 %. Hořčík nám umožňuje vytvrzování. Při ochlazování se ve slitině vylučuje hořčík jako fáze Mg_2Si . Slitiny získají vyšší pevnost po tepelném zpracování. Získaná pevnost se pohybuje přibližně od 250-300 MPa [12].

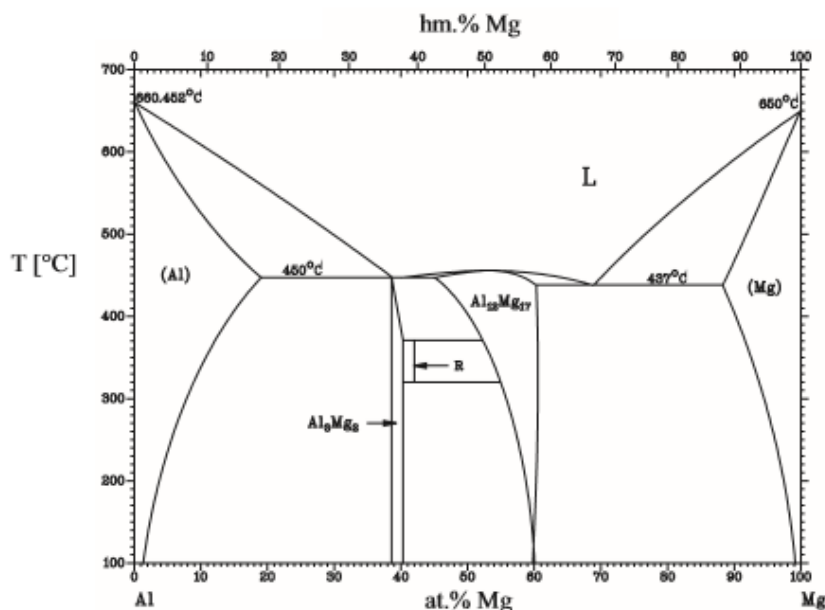
Mohou se odlévat do pískových forem i do kovových forem gravitačním i tlakovým litím. Uplatněním těchto slitin jsou vysoce namáhané odlitky-nejvíce v automobilovém a leteckém průmyslu. Ačkoli se po vytvrzení zlepšují mechanické vlastnosti, tažnost se oproti litému stavu snižuje [1].

Tab. 1 Minimální mechanické vlastnosti slitin na bázi Al-Si [10]

Typ slitiny	R _m (MPa)	A ₅ (%)	HB	Poznámka
AlSi10Mn	115	-	50	-
AlSi13Mn	140	2	45	-
AlSi7Mg	195	2	60	Tepelně zpracovaná
AlSi10MgMn	195	0,5	70	Tepelně zpracovaná
AlSi5Cu	150	1	45	-

2.2 Slitiny Al-Mg

Při eutektické teplotě 450 °C je maximální rozpustnost v hliníkových slitinách 17,4 %Mg. Při klesající teplotě se také snižuje rozpustnost. Eutektikum tvoří fáze $\alpha(\text{Al})$ a Al_8Mg_5 , která se také označuje jako fáze β . Eutektická koncentrace je 34,5 % Mg. Když je ve slitině obsažen křemík okolo 1 %, tak se hořík váže do Mg_2Si , která se vylučuje jako intermetalická fáze. Intermetalická fáze nám umožňuje provést vytvrzování. Obvykle se však odlitky používají tepelně nezpracované [1].



Obr. 5 Rovnovážný diagram Al-Mg [11]

Slitiny Al-Mg dělíme na tři typy, a to podle obsahu hoříku. Jsou to slitiny s obsahem 3, 5 a 9 % Mg [1].

Slitiny Al-Mg mají špatné slévárenské vlastnosti, zabíhavost, sklon ke vzniku staženin, trhlin a možnost nálitkování. Přidáním malého množství Si (od 0,5-2,5 %Si), lze získat lepší slévárenské vlastnosti. Po přidání křemíku se nám ale snižuje tažnost, z tohoto důvodu se přidává co nejméně křemíku [10].

S rostoucím obsahem hoříku zvyšuje se vznik oxidů MgO . Tyto oxidy nám nechrání hladinu před další oxidací, jak je to například u siluminů s oxidy Al_2O_3 .

U slitin Al-Mg se nejčastěji používá gravitační lití do kovových i pískových forem. U slitiny s 9 %Mg se používá pouze tlakové lití, protože má špatné slévárenské vlastnosti díky širokému pásmu tuhnutí [1].

Slitiny Al-Mg mají poměrně špatné mechanické vlastnosti. Pevnost s rostoucím obsahem hoříku roste, ale nedosahuje takových hodnot jako u siluminů. Naopak tažnost je vyšší (lití do písku $A > 3\%$, do kovových forem $A > 5\%$). Když teplota stoupne nad zhruba 100 °C, tak se mechanické vlastnosti zhoršují.

Slitiny mají vynikající obrobiteľnosť, lešiteľnosť a vysokou odolnosť proti korozi. Využitím pro tyto slitiny jsou stavby lodí, chemický a potravinářský průmysl. Z důvodu dobrého leštění a eloxování našly slitiny využití i pro dekorativní předměty [1].

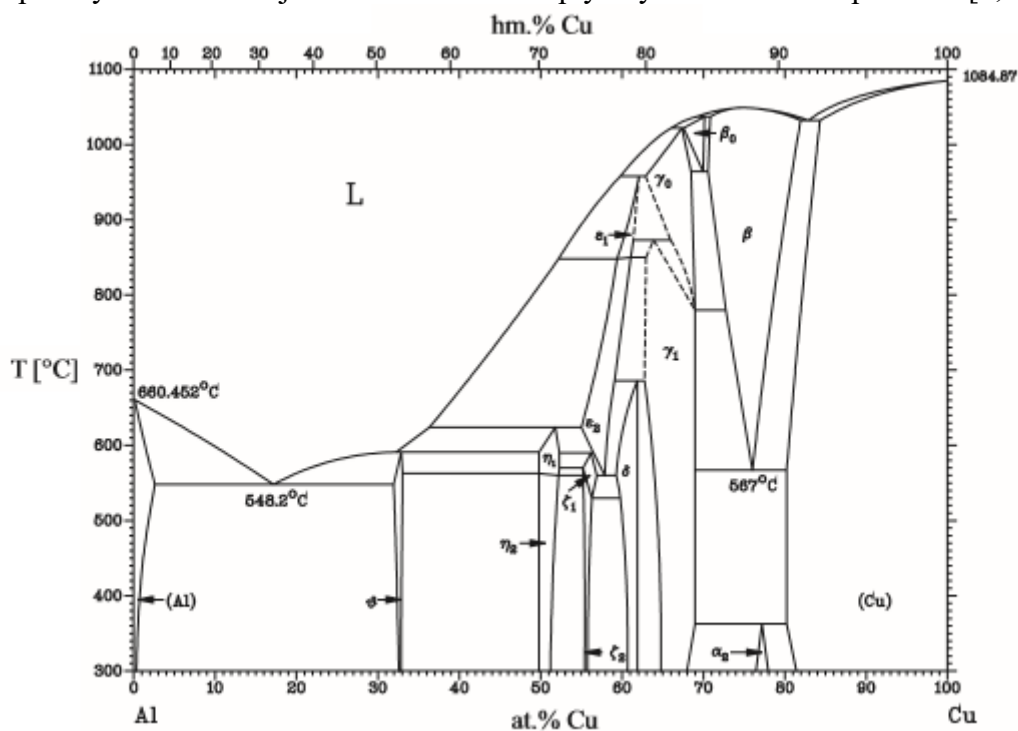
Tab. 2 Minimální mechanické vlastnosti slitin na bázi Al-Mg [10]

Typ slitiny	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A_5 (%)	HB	poznámka
AlMgSiMn	120	150	1	60	-
	160	200	1	80	Tepelně zpracovaná
AlMg5Si1Mn	88	167	3	60	-
AlMg11	-	280	9	60	Tepelně zpracovaná

2.3 Slitiny Al-Cu

Měď je v těchto slitinách omezeně rozpustná v tuhém roztoku α (Al) a tvoří eutektikum. Eutektikum tvoří fáze α (Al) a intermetalická fáze Al_2Cu . Při eutektické teplotě (548 °C) je koncentrace mědi 33,2 %. Rozpustnost mědi se při ochlazení snižuje, což nám umožňuje provádět vytvrzování za tepla i za studena. Obvyklý obsah mědi v těchto slitinách je 4-5 % Cu [1].

Slévárenské slitiny na bázi hliníku a mědi mají v porovnání se siluminy vyšší pevnostní charakteristiky při zvýšených teplotách. Oproti siluminům mají až dvojnásobnou tažnost a lomovou houževnatost. Na druhé straně mají horší odolnost proti korozi a zhoršené slévárenské vlastnosti. Slitiny Al-Cu mají široký interval tuhnutí a z tohoto důvodu jsou tyto slitiny obtížně nálitkovatelné. Přidáním křemíku můžeme zlepšit slévárenské vlastnosti, ale sníží se pevnostní vlastnosti. Slévárenské vlastnosti můžeme zlepšit zjemněním zrna díky očkování. Slitiny Al-Cu se odlévají gravitačním litím do pískových, kovových nebo skořepinových forem. Mají sklon ke vzniku rozptýlených staženin a k praskání [1,10].



Obr. 6 Rovnovážný diagram Al-Cu [11]

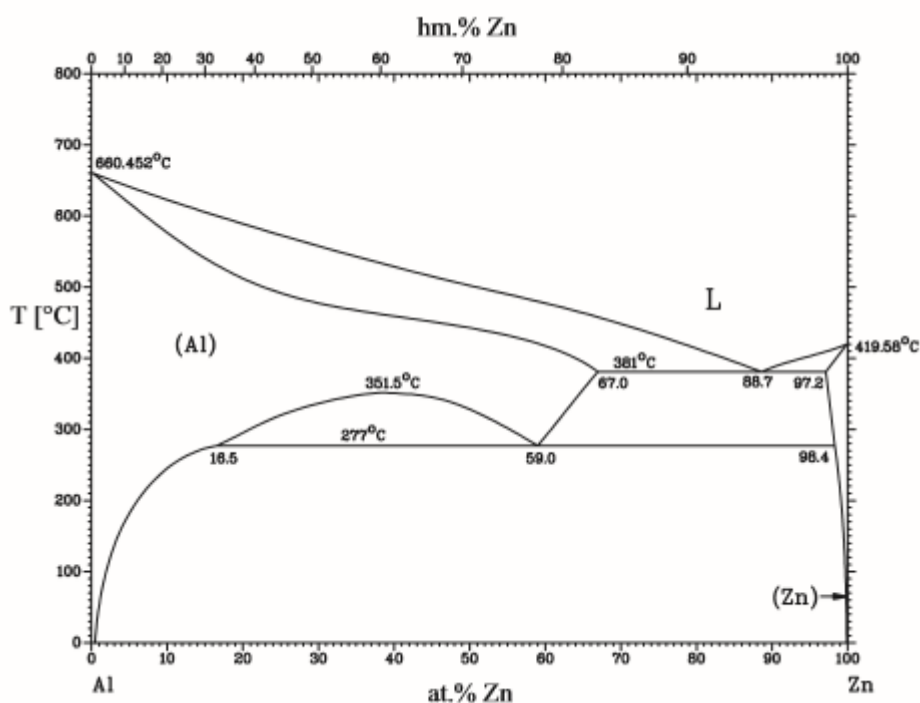
Tyto slitiny našly využití pro odlitky, které mají vysoké nároky na pevnost. Odlévají se z nich převodové skříně, hlavy válců, turbíny, součásti přehříváčů a další [1].

Tab. 3 Minimální mechanické vlastnosti slitin na bázi Al-Cu [10]

Typ slitiny	R _m (MPa)	R _{p0,2} (MPa)	A ₅	HB	Poznámka
AlCu8FeSi	177	-	-	50	-
	196	-	-	110	Tepelně zpracovaná
AlCu4Si5Zn	157	118	0,5	75	-

2.4 Slitiny Al-Zn

Slitiny na bázi hliník a zinek při eutektické teplotě 382 °C obsahují 94,5 %. Při vysokých teplotách je rozpustnost zinku v $\alpha(\text{Al})$ až 70 %, když teplota klesá, tak se snižuje. Rozpustnost zinku při pokojové teplotě klesne až na 2 %. Přítomnost mědi zvyšuje rozpustnost zinku na 5,5 % Zn.



Obr. 7 Rovnovážný diagram Al-Zn [11]

Když slitina obsahuje zinek a hořčík, tak se rozpustnost zinku velmi snižuje a vznikají intermetalické fáze $\text{MgZn}_2 + \text{Al}_2\text{Zn}_3\text{Mg}_3$. Tyto fáze umožňují vytvrzování. Jestli je přítomen zároveň i křemík, naváže se na něj hořčík a vzniká sloučenina Mg_2Si a Zn je rozpuštěn v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$. Slitiny zpravidla obsahují 5-7 % Zn a do 1 % Mg a samovolně se vytvrzují za studena během doby 20-30 dní. Tímto dosáhnou pevnost v tahu kolem 250 MPa, tažnost více než 5 % a tvrdost se pohybuje kolem 70 HB. Slitiny Al-Zn mají dobrou obrobitelnost a odolnost proti korozi, dají se výborně pájet a po obrobení nebo eloxování mají vynikající kvalitu povrchu. Mají však špatné slévárenské vlastnosti (sklon ke vzniku staženin, a především sklon k praskání za tepla) [1].

Slitiny Al-Zn-Mg mají obvykle lepší slévárenské vlastnosti než Al-Cu nebo Al-Mg. Oproti slitinám Al-Cu mají lepší korozivzdornost, ale může se projevit vyšší sklon ke korozi pod napětím. Tento sklon ke korozi pod napětím lze zmírnit přidáním Fe, a to v obsahu 0,8-1,2 % Fe. Tyto slitiny se také dobře svařují a jsou méně citlivé na změnu tloušťky stěn odlitků ve srovnání s ostatními slitinami hliníku [13].

3 TUHNUTÍ SLITIN HLINÍKU

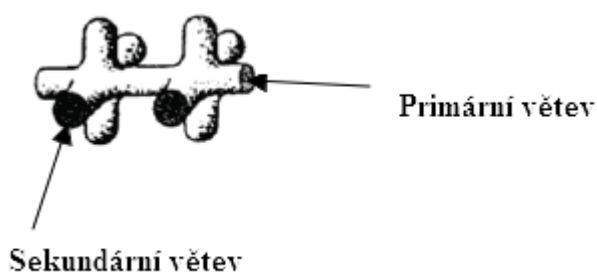
Strukturu slitin určuje tvar rovnovážných diagramů hliníku s přísadovými prvky. Struktura slitin je ovlivněna tuhnutím slitiny. Tuhnutí začíná nukleací (vznik zárodků), přes růst krystalů až po plně ztuhlý kov. Potom následuje ochlazování [1,14].

3.1 Tuhnutí primární fáze $\alpha(\text{Al})$

Nukleace primární fáze-obecně se nukleace krystalů dělí na homogenní a heterogenní. Homogenní nukleace probíhá u vysoce čistých kovů. U slitin hliníku probíhá heterogenní nukleace, při které vznikají v tavenině na mnoha místech stabilní zárodky krystalů. Zárodky krystalů vznikají na částicích, které jsou přítomné v tavenině. Jedná se o nečistoty, příměsi, částice uvolněné z vyzdívky pecí a tak dále. Ovlivňováním nukleace získáme různé velikosti i počet zrn, což má za následek ovlivnění mechanických vlastností slitin (slitiny s jemnozrnnou strukturou mají vyšší pevnost než slitiny s hrubozrnnou strukturou). Vznik zárodků umožňuje aktivací energie pro nukleaci zárodků. Nukleaci lze ovlivnit především rychlostí ochlazování taveniny a očkováním [1].

Očkováním nebo rychlým ochlazením se zvyšuje počet krystalizačních zárodků. Očkováním se zvýší množství zárodků. Při rychlém ochlazení slitiny dojde v tavenině k aktivaci zárodků, které jsou energeticky méně výhodné. U odlitků litých do kovových forem dochází k rychlému ochlazení. Díky tomuto rychlému ochlazení dochází k aktivaci většího počtu zárodků než u lití do pískových forem, kde je rychlost ochlazování menší [1,14].

3.1.1 Vznik dendritické struktury



Obr. 8 Dendrit [15]

Po přidání přísadového prvku do taveniny nastane rozdíl mezi skutečnou teplotou a teplotou, která odpovídá místnímu chemickému složení. Tento rozdíl se nazývá koncentrační přechlazení. Koncentrační přechlazení má vliv na morfologii mezifázového rozhraní. Při zvětšování koncentračního přechlazení se tak mění mezifázové rozhraní z rovinného, přes buněčné na dendritické. Čím menší je teplotní

gradient (to znamená čím je méně intenzivní ochlazení) v tavenině před procesem tuhnutí, tím tavenina inklinuje k dendritickému tuhnutí. Z toho plyne, že čím je větší koncentrační přechlazení, tím je větší tendence ke vzniku dendritické struktury [1].

Na krystalizačních zárodcích začnou vznikat útvary stromčkovitého rozvětveného typu. Tyto útvary se nazývají dendrity. Dendrity se skládají z primární větve a z ní vyrůstají sekundární větve. Dále mohou na sekundárních větvích vznikat dendritické větve vyšších řádů. Na začátku tuhnutí jsou mezery mezi sekundárními dendrity úzké [14,16].

Při vzniku dendritické struktury rostou osy primárních dendritů ve směru teplotního gradientu. Rostou tedy proti směru odvodu tepla. Další růst větví dendritů je pravidelný. Chemické složení v daném místě slitiny a doba chladnutí ovlivňuje hustotu sekundárních a řádově vyšších větví [1].

3.1.2 Hodnota DAS

Vzdálenost sekundárních os dendritů, která se označuje jako DAS (dendrite arm spacing), je nejdůležitější pro popis dendritické struktury. Velikost dendritů není ovlivněna pouze na chemickém složení dané slitiny, ale také přenosem tepla v odlitku během tuhnutí [1,17].

Definice místní doby tuhnutí je čas, ve kterém klesne v daném místě teplota z teploty likvidu na teplotu solidu. Místní dobu tuhnutí můžeme získat pomocí křivek chladnutí z diagramu nebo pomocí simulačního programu, v němž provedeme simulaci tuhnutí. Na velikosti zrn ani na stavu krystalizačních zárodků nezávisí hodnota DAS. Tato hodnota tedy nezávisí ani na vlivu očkování, ale ovlivňuje ji rychlost chladnutí v intervalu tuhnutí. Čím je tato doba kratší, tím menších hodnot DAS struktura dosahuje [1,18].

Závislost mezi dobou chladnutí a hodnotou DAS je dána vztahem [1]:

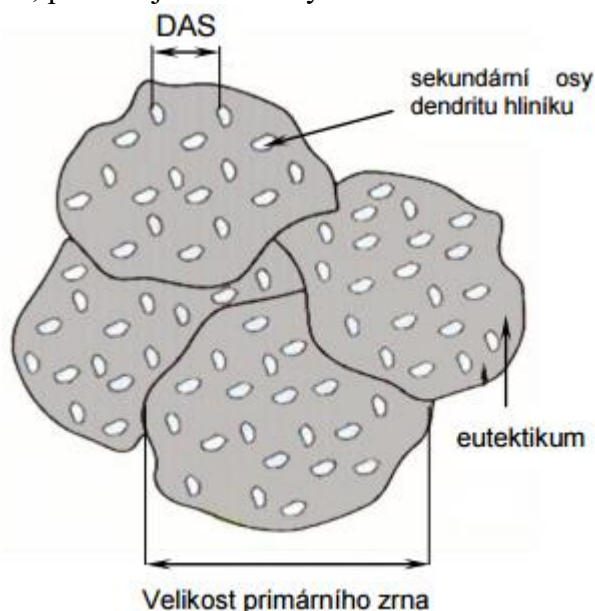
$$DAS = a \cdot t_f^n \quad [\mu m] \quad (3.1)$$

a – konstanta, která je závislá na slitině

n – konstanta, jejíž hodnota je v rozmezí $\langle 0,3; 0,5 \rangle$

t_f – místní doba tuhnutí [s]

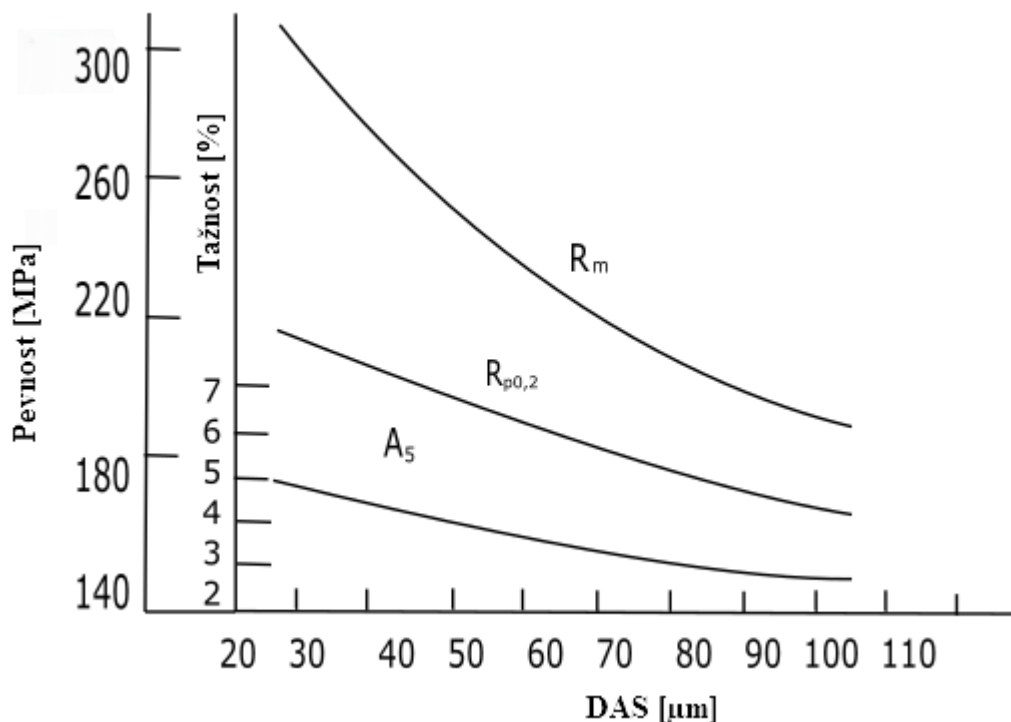
Tedy čím menší je velikost primárních zrn a hodnota DAS, tím lepší je chemická a strukturní homogenita slitin a tím lze dosáhnout lepších vlastností. Zjemnění primární fáze při tuhnutí lze dosáhnout rychlým ochlazováním nebo očkováním. Strukturu rozlišujeme na silně dendritickou nebo slabě dendritickou. Silně dendritická struktura je ta struktura, u které jsou větve jasně zřetelné, lamely křemíku krystalizovaly v mezidendritických prostorech a tím tedy oddělily α -Al fáze. Slabě dendritickou strukturu tvoří polyedrická zrna, jehlice křemíku krystalizovaly v objemu, proto nejsou dendrity fáze α -Al dobře čitelné [1,19].



Obr. 9 Základní strukturní elementy v podeutektické slitině Al-Si [1]

3.1.3 Vliv DAS na mechanické vlastnosti

Na velikosti hodnoty DAS je závislá celá řada strukturních jevů. Čím je struktura jemnější, tím pádem je menší hodnota DAS. Při menší hodnotě DAS vznikají menší segregční závislosti a tím vznikají menší částice intermetalických vměstků. Nečistoty obsažené v tavenině se vylučují odděleně v mezidendritických prostorech. Z tohoto důvodu vzniká z hlediska chemického složení více homogenní slitina. Při snížení hodnoty DAS má výsledná slitina lepší mechanické vlastnosti [1,20].



Obr. 10 Závislost mechanických vlastností slitin na DAS [1]

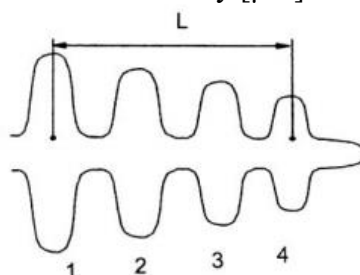
3.1.4 Měření DAS

Měření probíhá na metalografickém výbrusu, kde se na dendritu změří vzdálenost přes několik sekundárních os dendritu. Tato naměřená vzdálenost se vydělí počtem mezer mezi měřenými osami viz. obr. 11 [1].

$$DAS = \frac{L}{n-1} \quad [\mu m] \quad (3.2)$$

n ... počet sekundárních os [-]

L ... naměřená vzdálenost přes sekundární osy [μm]



Obr. 11 Měření DAS [1]

U silně dendritické struktury není problém najít vhodný dendrit pro měření hodnoty DAS. Naopak na některých výbrusech je problém najít dendrit, který je dobře čitelný. Proto na nečitelných výbrusech se pro určení hodnoty DAS používá vztah [19]:

$$DAS = \frac{L}{n} \cdot \frac{1}{V} \quad [\mu\text{m}] \quad (3.3)$$

n... počet sekundárních os [-]

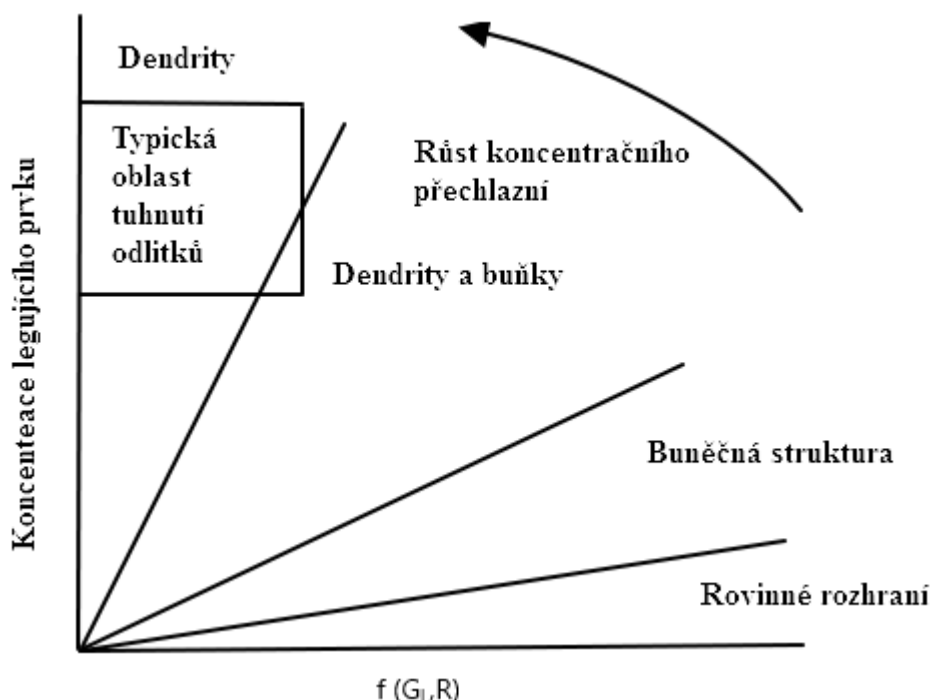
L... naměřená vzdálenost přes sekundární osy [μm]

V... hodnota zvětšení snímku [-]

3.1.5 Růst primární fáze

Růst krystalizačních zárodků začíná po jejich nukleaci, a to až do té doby, než je omezen sousedními krystaly. Hrubozrnnou a jemnozrnnou strukturu nám určuje počet aktivních krystalizačních zárodků. Pokud je v tavenině málo krystalizačních zárodků, výsledkem bude hrubozrnná struktura. Růst krystalů závisí na obsahu přísadového prvku, na jejich vzniku a na koncentračním přechlazení. Velikost koncentračního přechlazení vychází z koncentračního gradientu přísadového prvku na mezifázovém rozhraní, z teplotního spádu v tekuté fázi na krystalizační frontě – G_L a z rychlosti růstu primární fáze – R [1].

Popis tvaru strukturních složek vyjadřuje pojem morfologie struktury. V případě malého koncentračního přechlazení dosahuje jen několik Kelvinů. Intenzita chlazení je také malá, a proto nastává buněčné tuhnutí. Tuhnutí odlitků probíhá obvykle, když koncentrační přechlazení je velké a chemicky nehomogenní. Díky tomuto dochází k tuhnutí odlitků, kdy nastává růst dendritů. Příkladový prvek se vylučuje do taveniny i do mezidendritických prostor. Rychlost ochlazování odlitků je velmi významná pro tvorbu struktury odlitků. Díky tomuto se liší struktura odlitků litých do pískových a kovových forem [1].



Obr. 12 Souvislost morfologie tuhé fáze s velikostí koncentračního přechlazení [1]

Tuhnutí se dělí podle toho, jak narůstá tuhá vrstva na:

Exogenní tuhnutí – roste více celistvá vrstva. Tato vrstva roste směrem od povrchu odlitku do tepelené osy.

Endogenní tuhnutí – tuhnoucí krystaly rostou i v objemu kovu před krystalizační frontou.

Blíže k povrchu je tendence k exogennímu tuhnutí s hladkým rozhraním, dále od povrchu dochází spíše k tuhnutí objemovému. Vliv na to, jestli slitina bude tuhnout exogenně nebo endogenně, má i interval tuhnutí. Když je interval tuhnutí úzký, bude probíhat krystalizace spíše exogenně. U širokého intervalu tuhnutí bude krystalizace probíhat buněčným způsobem nebo endogenně. Očkování i modifikace má také vliv na průběh tuhnutí. Při očkování bude probíhat spíše endogenní objemové tuhnutí, u modifikace endogenní vrstvené nebo exogenní s rovinným rozhraním [1].

3.2 Očkování slitin hliníku

Očkování je proces vnášení vhodně zvolených prvků do taveniny. Cílem je zvýšení krystalizačních zárodků. Potenciální aktivní zárodek musí mít vyšší bod tavení, než je teplota tavení slitiny. Taktéž musí mít stejný typ mřížky jako ovlivňovaná slitina. Očkování ovlivňuje především počet zrn a tím i jejich velikost. Očkování slitin Al-Si je účinné především pro očkování podeutektických siluminů s obsahem křemíku 5-7 %. Podeutektické siluminy obsahují převážně primární fázi α -Al [9,11].

Teorie očkování [9]:

- 1) Teorie, která se zakládá na peritektické přeměně v soustavě Al – přechodný kov
- 2) Teorie, které se zakládají na vzniku intermetalických sloučenin hliníku s přechodným kovem, případně karbidu přechodných kovů
- 3) Teorie vycházející z elektronové stavby přechodných kovů, přičemž zjemňující účinek kovu je tím silnější, čím méně elektronů se nachází na d-dráze atomů

Autoři se nejvíce se přiklání k teorii intermetalických fází. Očkovadla vytváří v tavenině částice intermetalických fází, které působí jako aktivní podložky při krystalizaci slitiny.

Hlavní faktory ovlivňující účinnost očkování [9]:

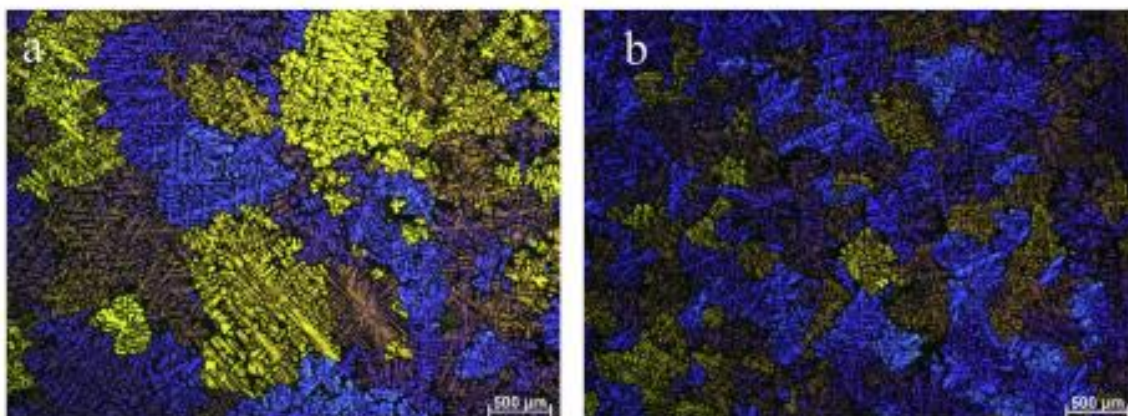
- Teplota přehřátí taveniny
- Rychlost ochlazování odlitku
- Očkovací doba

Při dosažení vysoké teploty přehřátí taveniny dojde k dezaktivaci (zbavení účinnosti), intermetalických fází. Pokud dojde k vysoké rychlosti ochlazování, očkovadla se zachytí v tuhém roztoku α -Al. Naopak malá rychlost ochlazování je příčinou koagulace intermetalických fází do rozměrných útvarů, které se vylučují jako samostatné strukturní složky. Tyto vyloučené intermetalické fáze jsou velmi křehké a velmi snižují mechanické vlastnosti. Krátká doba očkování má za následek, že nedochází k rozpuštění potřebného množství očkovadla, které je potřebné ke zjemnění zrna [10].

3.2.1 Očkovací prostředky

- **Očkovací slitiny** – Očkovací slitiny se dodávají ve formě tyčí s předepsanými rozměry. Očkování se tedy provádí ponořením tyče do roztavené slitiny, taveninu je poté nutné promíchat. Dávkování očkovadla je velmi jednoduché, je dáno počtem tyčí na hmotnost vsázkového kovu. Očkovací účinek se dostaví velmi rychle, tudíž je možno po naočkování ihned odlévat [1].
- **Očkovací soli** – Očkování pomocí očkovacích solí se provádí jejich ponořením zvonem ke dnu lázně a následném promícháním taveniny. Množství je doporučeno výrobcem. Aby se do taveniny nevnikla vlhkost, musí být tyto soli dobře vysušené [1].

Silný očkovací účinek mají titan, bór, vanad a zirkon. Niob, molybden, chrom, kobalt, cín a nikl jsou méně účinná očkovadla [10].



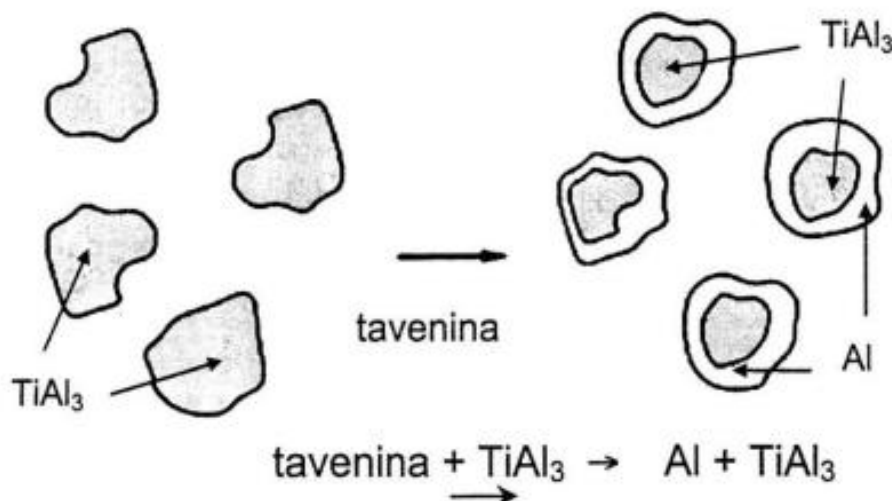
Obr. 13 Vliv očkování na velikost zrn, a) bez očkovadla, b) očkování pomocí 0,2 %Al₅Ti₁B [21]

3.2.2 Očkování titanem

Očkování samotným titanem je jen málo účinné, také se při něm dosahuje nejhoršího zjemnění. Při teplotě 665 °C a koncentraci Ti 0,19 % nastává peritektická přeměna. Při očkování titanem vznikají intermetalické fáze TiAl₃ a TiAl. Aktivní složkou je intermetalická fáze TiAl₃. Při peritektické teplotě reaguje fáze TiAl₃ s taveninou hliníku a vzniká primární fáze α(Al). Intermetalická fáze TiAl₃ má kubickou plošně centrovanou mřížku, stejně jako hliník. Také má mřížka intermetalické fáze TiAl₃ blízký parametr jako u hliníku a tím je vhodným krystalizačním zárodkem. Částice TiAl₃ je obalena tuhým roztokem α(Al) a kolem tohoto obalu pokračuje růst dendritů hliníku [1,11].

Očkovací soli jsou součástí očkovacích tablet. Tyto soli jsou v takových kombinacích a koncentracích, aby byl očkovací účinek co nejefektivnější pro určitý typ slitin. Obvyklé dávkování je 0,1-0,4 % hmotnost taveniny. Při očkování očkovacími předslutinami je většinou obsah titanu 5 %. Očkovací účinek je účinnější, čím je jemnější disperzita TiAl₃. Aby bylo zjemnění primární fáze efektivní, je nutné přidat do taveniny 0,02-0,1 %Ti. V naočkované slitině se zárodky TiAl₃ postupně rozpouštějí a dochází k odeznívání očkovacího účinku.

Očkovací účinek, který je efektivní pro zjemnění primární fáze $\alpha(\text{Al})$, trvá zhruba 30-45 minut [1].



Obr. 14 Nukleace zárodků TiAl_3 [1]

3.2.3 Očkování bórem

Při použití bóru jako samostatného očkovacího prvku dochází k největšímu zjemnění primární fáze $\alpha(\text{Al})$. Vznikají zde intermetalické fáze AlB_2 , které slouží jako krystalizační zárodky. Fáze AlB_2 je do taveniny vnášena ve formě předslitin AlB (např. AlB_4). Tyto předslitiny obsahují hrubé částice, které se v tavenině pomalu rozpouštějí. Tímto dochází k segregaci fáze AlB_2 , a proto určení koncentrace bóru na dosažení efektivního očkování je velmi těžké. Východiskem je použití předslitiny SiB . Obsah bóru v této předslitině je 1,4 %. Okolo jedné třetiny bóru je rozpuštěno v křemíku, zbytek se vyskytuje jako borid křemíku. Borid křemíku se v tavenině lehce rozpouští. Očkování předslitinou AlB není závislé na teplotě očkování ani na výdrži na této teplotě. Doba výdrže se pohybuje kolem 10 minut [11].

Při vyšším obsahu titanu, který je obsažen v očkovací předslitině, dochází ke zhoršení zjemňujícího účinku bóru. Reakcí titanu a bóru vzniká fáze TiB_2 . Tato fáze má za následek snížení obsahu bóru v tavenině, a tudíž se zhoršují podmínky pro vznik AlB_2 . Krystalizace fáze AlB_2 probíhá až při eutektické přeměně, ale to už nemůže působit jako očkovadlo. Díky rozdílným parametrům mřížky TiB_2 a hliníku nemohou částice fáze TiB_2 působit jako krystalizační zárodky. Toto vede k obtížnému určení optimálního množství bóru pro efektivní očkování. Menší množství titanu očkovací účinek zvýší. Množství bóru je v předslitině AlB_4 cca 0,2-0,4 % AlB_4 [11,22].

3.2.4 Očkování kombinací titan a bór

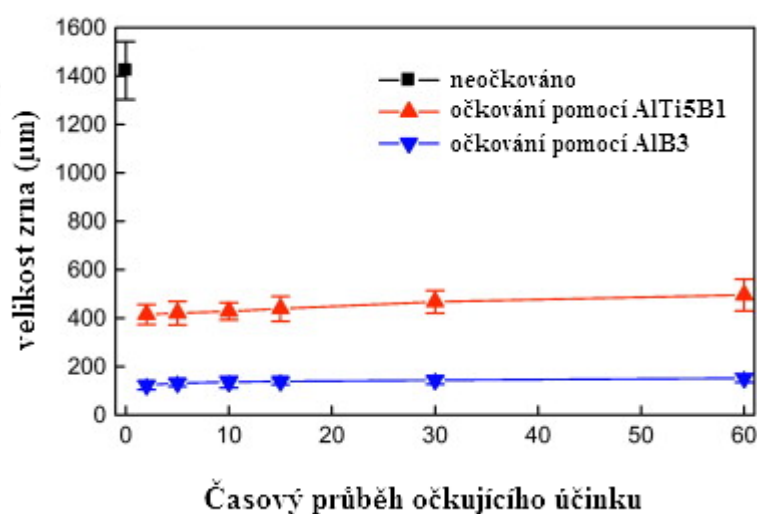
Při očkování kombinací titanu a bóru dochází ke zkvalitnění očkovacího účinku. Očkovací účinek není tak efektivní jako u samotného bóru, ale je účinnější než při očkování samotným titanem [1,11].

Očkováním titanem a bórem ve vzájemné kombinaci vznikají intermetalické částice AlB_2 , TiB_2 , $(\text{Al}, \text{Ti}) \text{B}_2$. Velikost těchto fází je 0,5-2 μm . Z tohoto plyne, že jsou mnohem menší než TiAl_3 . Tyto částice jsou krystalizačními zárodky. Do taveniny se dostanou formou předslitiny AlTiB . Předslitiny mají rozdílný obsah titanu a bóru. Nejčastěji se předslitiny vyrábějí s 1 %B a 5 %Ti. Fáze TiB_2 , ve které je vázán bór, jsou nerozpustné a jsou v předslitině jemně vyloučené. Polyedrické částice intermetalické fáze TiAl_3 jsou v tavenině rozpustné. Částice

TiB₂ nemohou působit jako krystalizační zárodky, protože mají jinou krystalovou mřížku jako hliník. Při očkování probíhá difuze hliníku do fáze TiB₂ a difuze titanu z fáze TiB₂. Díky této difuzi vzniká obal TiAl₃ na částicích fáze TiB₂. Přidáním předslitiny AlTiB, vzniknou krystalizační zárodky TiAl₃. Jsou to pouze ty zárodky, které se nerozpustily [1,23].

Teplota, při které se očkuje kombinací titanu a bóru se shoduje s teplotou, při které se slitiny Al-Si odlévají. Teplota by ale neměla být vyšší než 750 °C. Při této teplotě struktura mírně zhrubne. Aby se vytvořilo dostatečné množství krystalizačních zárodků měla by tavenina vydržet na očkovací teplotě 5-10 minut. Při vyšším obsahu křemíku se snižuje očkující účinek předslutin AlTiB. Z tohoto důvodu je nutné přidání většího množství předslitiny AlTiB.

Pro optimální očkující účinek se používá 0,1-0,2 % AlTiB. Na zjemňující účinek má také vliv obsah titanu. Optimální obsah titanu pro zvýšení očkujícího efektu je 0,1-0,2 % [1,10].



Obr. 15 Rozdíl ve velikosti zrna při očkování slitiny AlSi10Mg(a) očkovačly AlTi5B1 a AlB3 [22]

3.2.5 Očkování dalšími prvky

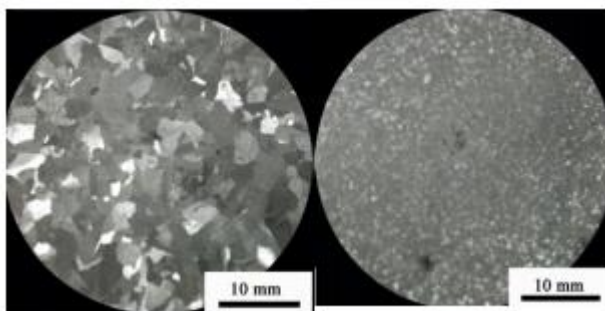
Mimo očkování titanem, bórem a kombinací titanu a bóru se používají další prvky pro očkování slitin hliníku.

Fosfor [1,10]

- Fosfor se používá pro očkování nadeutektických siluminů.
- Naočkováním fosforem se zmenší částice primárního křemíku.
- Fosfor se dávkuje v závislosti na obsahu křemíku. Čím je větší obsah křemíku, tím více musíme fosforu dodat.
- Očkováním vzniká velký počet zárodků AlP.
- Fosfor se jako očkovačlo používá ve formě solí (např. PCl₅), nebo předslitiny CuP₁₀.

Skandium [24,25]

- Hlavní očkující účinek je díky heterogenní nukleaci.
- Skandium má očkující i modifikační účinek.
- Při očkování skandiem se tvoří intermetalická fáze Al_3Sc . Tato intermetalická fáze je vhodná pro tvorbu krystalizačních zárodků.
- Pro očkování skandiem je třeba použít větší množství skandia, díky menšímu očkujícímu účinku



Obr. 16 Struktura neočkované slitiny vlevo a po přidání 0,8 %Sc vpravo [25]

Jako další očkovadla se mohou použít například zirkonium, vanad, niob, molybden a chrom.

3.3 Modifikace eutektika u slitin Al-Si

Modifikace je metalurgický proces, u kterého se tavenina upravuje prvky nebo jejich slitinami k ovlivnění tuhnutí eutektika. Modifikací se mění velikost a morfologie krystalů křemíku. Pokud má slitina menší obsah křemíku jak 5 % nemá na ni v podstatě vliv [1].

Teorie principu modifikačního prvku [10]:

- Omezení růstu eutektického křemíku adsorbí povrchově aktivního prvku.
- Potlačení nukleace křemíku při rovnovážné teplotě eutektické přeměny vlivem odlišných podmínek krystalizace za přítomnosti modifikátoru.
- Teorie vzniku ternárního eutektika spočívá v tom, že modifikační činidla tvoří s křemíkem a hliníkem ternární eutektikum. Díky vzniku ternárního eutektika vzniká jemnozrnná struktura.
- Modifikování bylo vysvětleno také koloidní teorií. Podle této teorie modifikační přísady brání ve shlukování atomů hliníku a křemíku

Experimentálně byly získané tyto informace [9]:

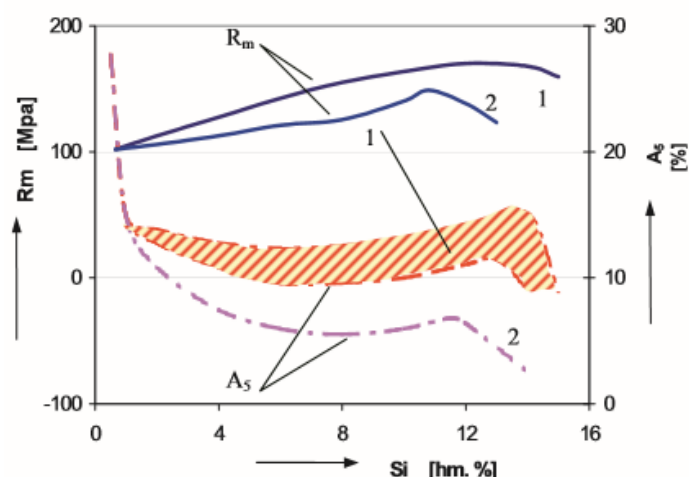
- Už při nízkém obsahu povrchově aktivního prvku (0,001 až 0,1 hm. %) v tavenině dochází ke změně tvaru eutektického křemíku
- Podobně jako u nemodifikovaných slitin představuje křemík spojitou fázi a roste z jednoho centra

- Vlivem modifikování a stejných podmínek chladnutí se nemění počet eutektických buněk
- Začátek krystalizace primární fáze $\alpha(\text{Al})$ není ovlivněn modifikací
- Modifikační přísada zpožďuje nukleaci eutektického křemíku. A v důsledku tohoto klesá teplota eutektické přeměny a zvyšuje se eutektická koncentrace křemíku.

3.3.1 Vliv modifikace na vlastnosti hliníkových slitin

Zvýšení mechanických vlastností závisí na tom, jak se liší struktury modifikovaných a nemodifikovaných slitin. Při lití do pískových forem se vlivem modifikace struktura výrazně zjemní oproti nemodifikované slitině, a z tohoto důvodu bude nárůst mechanických vlastností velký. Naopak při lití do kovových forem pod tlakem jsou struktury u modifikovaných

a nemodifikovaných slitin příliš podobné, a proto se vlivem modifikace příliš nezmění mechanické vlastnosti [10].



Obr. 17 Vliv modifikace na mechanické vlastnosti slitin Al-Si (1- modifikované slitiny. 2- nemodifikované slitiny) [11]

Eutektikum se ve slitinách Al-Si modifikuje prvky skupiny IA a IIA v periodické tabulce prvků. Ale významné je modifikování pouze sodíkem, stronciem a antimonem [9].

3.3.2 Modifikace slitin Al-Si sodíkem

Sodík je povrchově aktivní prvek. Modifikace sodíkem probíhá převážně v podeutektických a eutektických slitinách Al-Si [9].

Obsah fosforu má vliv na modifikaci sodíkem. Přítomnost fosforu ve slitině ruší vliv sodíku. Kritická hodnota obsahu fosforu ve slitině závisí na chladnutí odlitku. Množství fosforu v technicky čistých slitinách Al-Si se pohybuje v rozmezí od 0,0012 do 0,0015 %. Křemík obsahuje zhruba 0,012 % P, a je tedy zdrojem této příměsi. Nepřiměřené zvýšení koncentrace fosforu nastává při tavení vratného materiálu [10].

Nevýhody použití sodíku jako modifikátoru [9]:

- Zvyšuje stupně naplynění taveniny a rozšíření intervalu tuhnutí, což má za následek rozptýlené pórovitosti v odlitku
- Krátká doba účinnosti
- Rychlý propal v důsledku malé hustoty sodíku

Modifikační prostředky pro modifikaci sodíkem [1]:

Kovový sodík – Kovový sodík má velkou reaktivnost, proto se aplikuje ve vakuovaných patronách, které jsou vyrobeny z hliníkového plechu. Výhodou je, že se rychle roztaví a nevnáší žádný cizí prvek. Pomocí zvonu se patrony ponoří ke dnu lázně, kde jsou drženy až reakce skončí.

Modifikační soli – Modifikační soli se dodávají v práškové podobě, nebo ve formě tablet a jsou to směsi chloridů a floridů. Taktéž se ponoří zvonem na dno lázně. Po dokončení reakce je nutné taveninu zamíchat a stáhnout vyplavané produkty reakce z hladiny.

Exotermické modifikační tablety – při této modifikaci se využívá exotermický efekt. Dochází k němu buď hořením hliníkové krupičky za přítomnosti oxidovadla, nebo hořčíkovými trískami, kde oxidovadlo není nutné. Hoření exosměsi způsobí vysoké teploty, při kterých dojde k destrukci skeletu tablet a uvolňování sodíku z nich ve formě par. Do taveniny se dostane jen určitá část sodíku (maximálně kolem 30 %). Zbytek vyhoří na hladině. Tento způsob modifikování nám zaručí vysoké využití sodíku.

Odplyňováním taveniny dochází ke ztrátám sodíku, protože sodík difunduje do bublin, a tedy uniká z taveniny. Při odplynění nelze použít přípravky, které obsahují chlor nebo fluor z důvodu velké afinity sodíku k nim. Z těchto důvodů musí modifikace následovat až po odplynění [1].

3.3.3 Modifikace slitin Al-Si stronciem

Stroncium má menší modifikační účinek než sodík, ale je méně reaktivní. Dávkování stroncia u podeutektických slitin je 150-220 ppm u eutektických 400 ppm Sr. Pro modifikaci se používá stroncium jako předslitina s hliníkem. V této předslitině bývá obvykle 3,5-10 % Sr. Stroncium je v předslitinách ve formě Al_4Sr . Tyto částice se v tavenině rozpadají a začnou reagovat s křemíkem za vzniku $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$. Dále dochází k uvolnění čistého Sr, rozpadem sloučeniny $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$. Čisté stroncium, jelikož je povrchově aktivní prvek, modifikuje eutektikum [1,11].

Modifikační účinek stroncia nenastává hned. Čas, za který nastává modifikační účinek, je závislý na teplotě a pohybu lázně. Není vhodné odlévat hned po modifikaci stronciem, protože se úroveň modifikace zlepšuje i několik desítek minut po modifikaci. Odezdnívání modifikačního účinku je pomalé a dochází k němu oxidací, při které dochází ke ztrátám stroncia. Modifikační účinek trvá běžně 3-6 hodin. Stejně jako u modifikaci sodíkem lze zrušit modifikaci stronciem přítomností fluoru nebo chloru [1,10].

Porovnání účinku modifikace sodíku a stroncia [9]:

- Stroncium má schopnost modifikovat eutektikum dlouhodobě
- Sodík působí ihned, účinek stroncia se projeví po inkubační době, která je asi 30 minut
- Sodík a stroncium lze při modifikaci kombinovat
- Stroncium nezvyšuje naplynění
- Předávkování sodíkem se projeví světlym lomem a pórovitostí, u předávkování stronciem je způsobeno zhrubnutí struktury hrubými krystaly stronciumaluminidu.

3.3.4 Modifikování slitin Al-Si antimonem

Modifikování antimonem se osvědčilo při kokilovém lití. Modifikované podeutektické slitiny mají výborné slévarenské vlastnosti a dobré pevnostní vlastnosti. Obsah antimonu snižuje plošný podíl křemíku v eutektiku. Antimon ruší modifikační účinek sodíku i stroncia. Antimon má v množství 0,1-0,2 % podobný účinek jako sodík. Musí se dbát na to, aby se do vsázky nedostal sodík, proto se nedoporučuje používat současně slitiny modifikované sodíkem a slitiny modifikované antimonem v jedné slévárně [1,9,11].

3.3.5 Modifikace slitin Al-Si dalšími prvky

Modifikační účinek mají na siluminy i další prvky než dosud zmíněné [9,11]:

Vápník

- U modifikace vápníkem docházejí autoři k rozporu. Jedna část považuje vápník za modifikátor a druhá část tvrdí, že se jedná o škodlivý prvek.
- S rostoucím obsahem vápníku se projevuje sklon ke zvýšení oxidace slitin
- Vzniká intermetalická fáze CaSi_2 , která narušuje homogenitu struktury a snižuje mechanické vlastnosti.
- Vápník a stroncium ve vzájemné kombinaci ruší svůj modifikační účinek.

Barium

- Modifikace bariem je podobná jako u modifikace stronciem.
- Modifikační účinek můžeme stabilizovat tím, že přidáme malé množství beryllia.

Telur

- Při množství 0,04-0,4 má telur trvalý modifikační účinek.
- Pokud slitiny obsahují více než 13 % křemíku, tak po modifikaci nedochází ke zvýšení mechanických vlastností.

Síra

- Doporučené množství pro modifikaci sírou je 0,01-0,02 %.

4 EXPERIMENT

Cílem této práce je dokázat vliv rychlosti ochlazování a očkování na hodnotu DAS. Experiment se prováděl na slitině AlSi10Mg(a).

Struktura experimentu:

- Natavení vsázky a následné odlití nenačkované slitiny
- Očkování a odlití naočkované slitiny
- Nařezání a zalisování vzorků z odlitků
- Broušení a leštění vzorků
- Nafocení struktury pod mikroskopem
- Naměření hodnoty DAS

Experiment se prováděl ve slévárně a laboratořích na fakultě FSI VUT v Brně.

Slitina AlSi10Mg(a) je mírně podeutektická slitina, která má malý obsah doprovodných prvků a nečistot. Tato slitina má výborné slévárenské a technologické vlastnosti. Taktéž se tyto slitiny vyznačují dobrou obrobiteľností a korozivzdorností. Odlévají se všemi technologiemi. Při lití do kokilových forem je prospěšná modifikace, pro lití do pískových je dokonce nutná modifikace sodíkem. Tato slitina se používá pro tenkostěnné tvarově složité odlitky. Pro své dobré mechanické vlastnosti se používá pro vysoce namáhané strojní součástky. Tudíž své uplatnění našly tyto slitiny v automobilovém a leteckém průmyslu [1].

Tab. 4 Chemické složení slitiny AlSi10Mg(a) dané normou [1]

Chemické složení (%)									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
9-11	0,55 (0,45)	0,05 (0,03)	0,45	0,2-0,45 (0,25-0,45)	0,05	0,10	0,05	0,05	0,15

Tab. 5 Mechanické vlastnosti odděleně odlitých zkušebních těles ze slitin AlSi10Mg(a) litých do pískové formy [1]

Označení stavu	Mez pevnosti v tahu Rm [MPa] Min.	Smluvní mez kluzu Rp0,2 [MPa] Min.	Tažnost A ₅ [%]	Tvrдость podle Brinella HBW Min.
F	150	80	2	50
T6	220	180	1	75

Tab. 6 Mechanické vlastnosti odděleně litých zkušebních těles ze slitin AlSi10Mg(a) litých do kovové formy [1]

Označení stavu	Mez pevnosti v tahu Rm [MPa] Min.	Smluvní mez kluzu Rp0,2 [MPa] Min.	Tažnost A ₅ [%]	Tvrdost podle Brinella HBW Min.
F	180	90	2,5	55
T6	260	220	1	90
T64	240	200	2	8

F-v litém stavu, T6-vytvrzování na optimální pevnost a tažnost, T64-vytvrzeno na optimální tažnost

Chemické složení odlitků bylo změřeno pomocí optického emisního spektrometru Q4 Tasman.

Tab. 7 Změřené chemické složení neočkované slitiny AlSi10Mg(a)

Chemické složení (%)									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
9,482	0,297	0,021	0,189	0,300	0,0038	0,037	0,005	0,0023	0,016

Tab. 8 Změřené chemické složení očkované slitiny AlSi10Mg(a)

Chemické složení (%)									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
9,473	0,307	0,021	0,192	0,308	0,004	0,036	0,005	0,0024	0,022

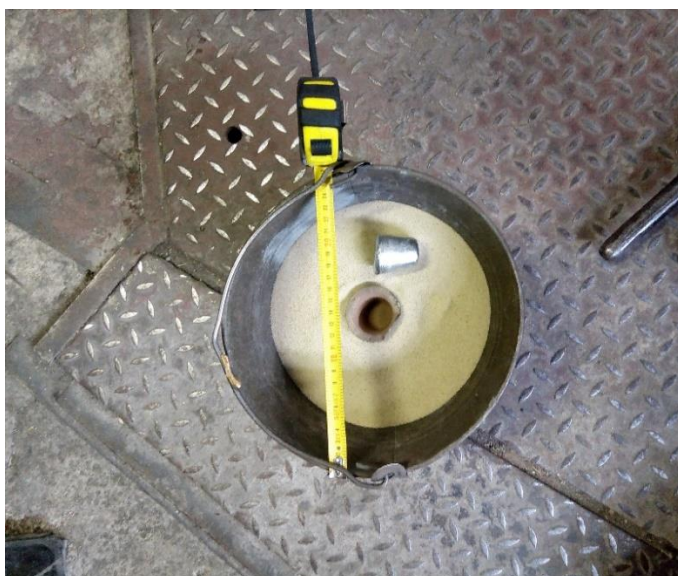
Po porovnání změřeného chemického složení odlitých odlitků a chemického složení slitiny AlSi10Mg(a) daného normou vyplývá, že žádný prvek nepřesahuje maximální hodnotu normovaného chemického složení.

4.1 Odlévání vzorků

Nejdříve probíhalo natavení 4200 g vsázky v elektrické odporové peci. Poté se odlily odlitky do kovové kokily a do písku, aby se změnila rychlost ochlazování odlitku. Díky izolaci písku chladl odlitek litý do písku pomaleji. Dávkování očkovačla Al5TiB1 bylo 0,15 % z hmotnosti taveniny. Po naočkování se tavenina promíchala a odlila se očkovaná slitina také do kovové kokily a do písku. Lící teplota byla 650 °C a měřila se ponorným termočlánkem. Značení odlitků je uvedeno v tabulce 9.

Tab. 9 Označení odlitků

Odlitek litý do písku (neočkován)	Odlitek litý do písku (očkován)	Odlitek litý do kovové kokily (neočkován)	Odlitek litý do kovové kokily (očkován)
1A	1B	2A	2B



Obr. 18 Odlitek odlitý do písku



Obr. 19 Odlitek odlitý do kovové kokily



Obr. 20 Elektrická odporová pec

4.2 Příprava metalografických vzorků

V dalším kroku probíhalo nařezání vzorků z odlitků na laboratorní rozbrušovací pile Labotom-3.



Obr. 21 Místo odběru vzorku z odlitku litého do kovové kokily



Obr. 22 Místo odběru vzorku z odlitku litého do písku

Po nařezání vzorků následovalo jejich zalisování za tepla. Vzorek se umístil do lisu a zasypal se přiměřeným množstvím Dentacrylu. Zalisování jednoho vzorku trvalo přibližně 12 minut za teploty 220 °C. Lisování probíhalo v lisu ECOPRESS 100.



Obr. 23 Laboratorní rozbrušovací pila Labotm-3



Obr. 24 Lis ECOPRESS100 [26]

Jakmile byly vzorky zalisovány, probíhalo jejich broušení a leštění. Broušení a leštění probíhalo na laboratorním přístroji LaboPol – 5 od firmy Struers s rotační hlavou. Broušení probíhalo pod vodou, při leštění byla použita diamantová emulze. Délka jednoho cyklu broušení i leštění byla 5 minut. Nastavení otáček rotační hlavy při broušení bylo 300 otáček za minutu. Při leštění se snížily otáčky na 150 otáček za minutu. Použity byly brusné kotouče o různých zrnitostech. Sled použití brusných kotoučů:

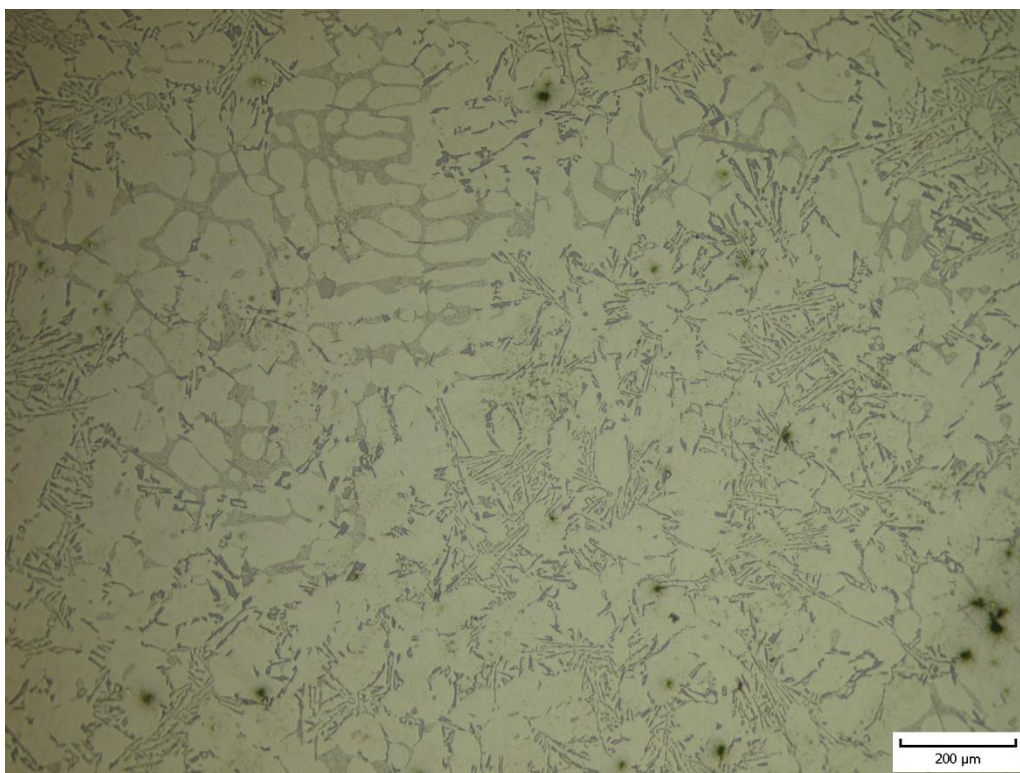
1. Brusný kotouč MD piano 80
2. Brusný kotouč MD Piano 220
3. Brusný kotouč MD Piano 800
4. Brusný kotouč MD Piano 1200

Jakmile bylo dokončeno broušení vzorků na adekvátní kvalitu, byly vzorky omyty vodou a lihem a následně osušeny. Potom následoval proces leštění vzorků:

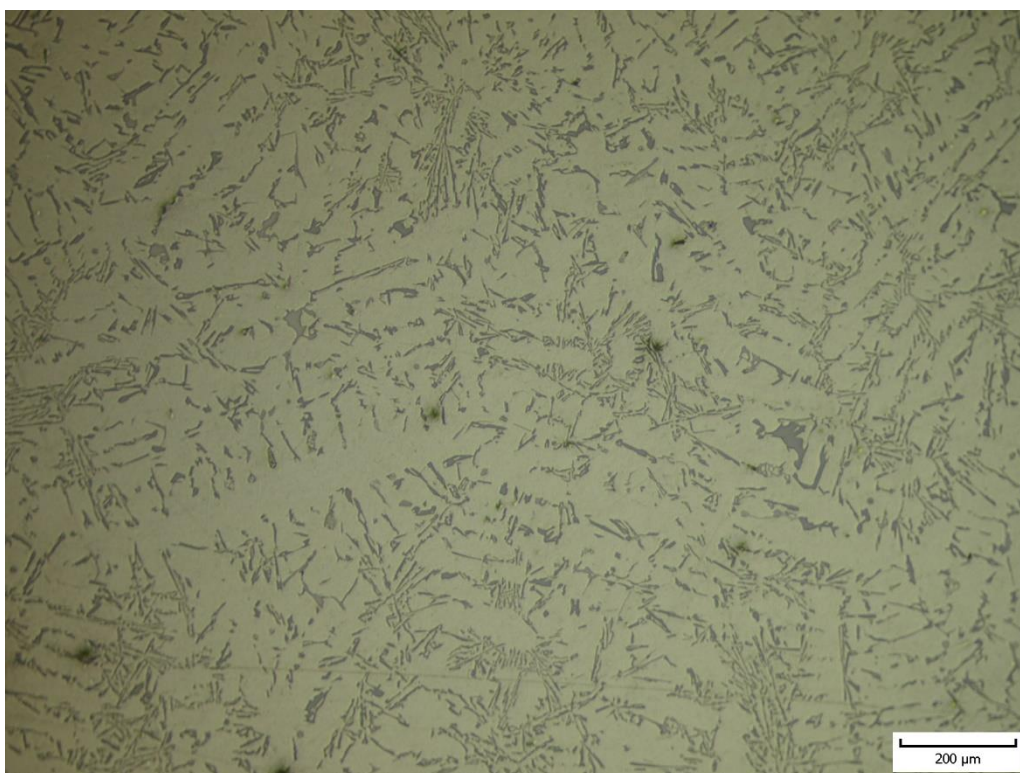
1. Leštící kotouč MD Largo 9 μm
2. Leštící kotouč MD Nap 3 μm

Po vyleštění vzorků byly vzorky opět omyty vodou a lihem. Taktéž byly vzorky osušeny.

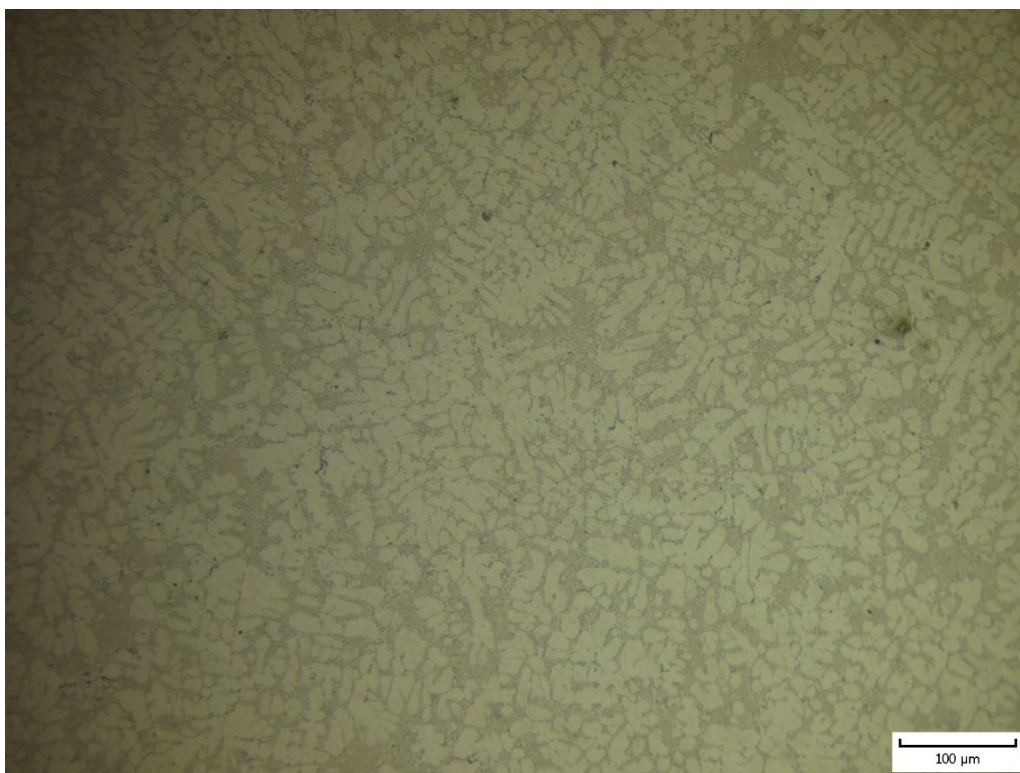
Na vybroušených a vyleštěných vzorcích byly vyfoceny jejich mikrostruktury pomocí světelného mikroskopu MTM 406. Fotky byly zpracovány v programu QuickPHOTO Industrial 2.2. Mikrostruktury vzorků z odlitků litých do písku byly foceny se zvětšením 100x a vzorky z odlitků litých do kovových kokil se zvětšením 200x.



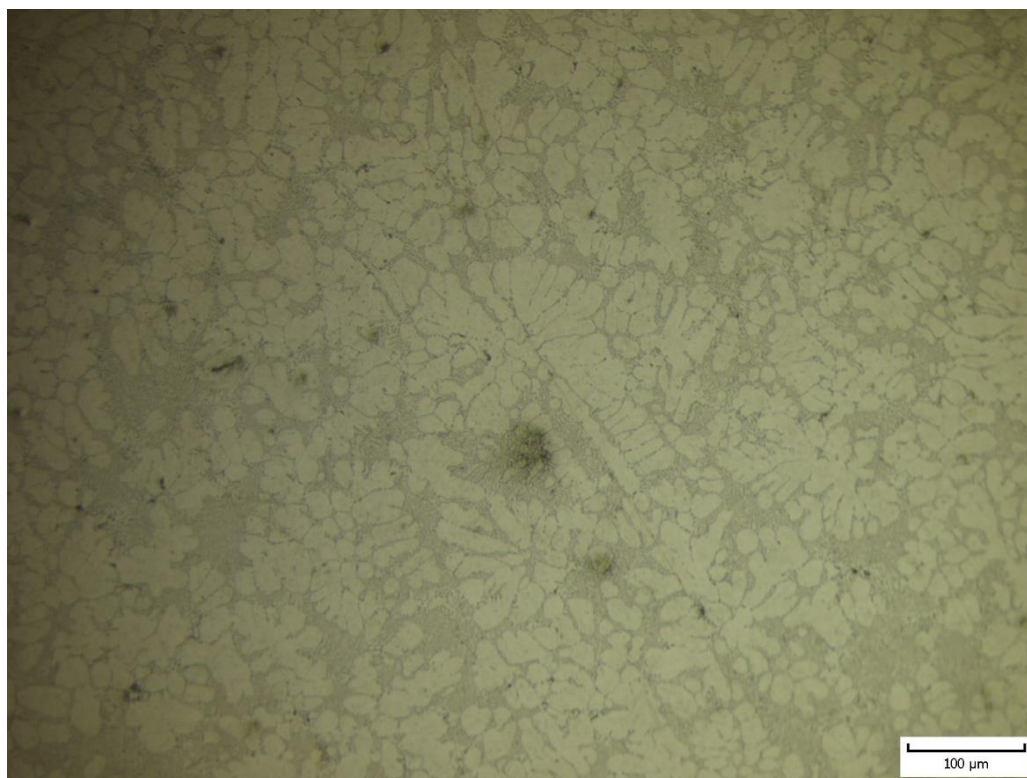
Obr. 25 Mikrostruktura odlítka litého do písku (neočkováno)



Obr. 26 Mikrostruktura odlítka litého do písku (očkováno)



Obr. 27 Mikrostruktura odlitku litého do kovové kokily (neočkováno)



Obr. 28 Mikrostruktura odlitku litého do kovové kokily (očkováno)



Obr. 29 Světelný mikroskop MTM 406

4.3 Měření hodnot DAS

Vzdálenosti sekundárních os dendritů se měřily viz obr. 11 z obrázků mikrostruktur (obr. 25), (obr. 26), (obr. 27) a (obr. 28). Změřila se vzdálenost L a tato vzdálenost se dosadila do vzorce 3.2 pro výpočet hodnoty DAS. Měřilo se 15 dendritů na každém vzorku. Tyto naměřené hodnoty byly zprůměrovány a byly vypočteny směrodatné odchylky pomocí programu Microsoft Excel 2016. Naměřené hodnoty včetně průměrů a odchylek byly zapsány do tabulky 10.

Tab. 10 Naměřené hodnoty DAS

Hodnoty DAS pro odlitky lité do písku (neočkované) 1A		Hodnoty DAS pro odlitky lité do písku (očkované) 1B		Hodnoty DAS pro odlitky lité do kovové kokily (neočkované) 2A		Hodnoty DAS pro odlitky lité do kovové kokily (očkované) 2B	
n	DAS [μm]	n	DAS [μm]	n	DAS [μm]	n	DAS [μm]
1	37,09	1	32,25	1	7,75	1	7,75
2	41,93	2	32,25	2	8,77	2	8,08
3	41,93	3	33,17	3	8,88	3	8,88
4	43,00	4	33,86	4	9,04	4	9,04
5	43,00	5	35,48	5	9,15	5	9,69
6	45,15	6	39,99	6	9,69	6	10,50
7	49,45	7	40,31	7	9,70	7	10,77
8	58,05	8	40,85	8	10,50	8	11,31
9	51,60	9	45,15	9	11,31	9	11,63
10	51,60	10	47,30	10	11,31	10	11,71
11	51,60	11	49,45	11	11,31	11	12,11
12	51,60	12	49,45	12	12,11	12	12,92
13	51,60	13	50,31	13	12,92	13	14,00
14	56,76	14	51,60	14	16,15	14	14,00
15	60,20	15	54,83	15	16,15	15	19,38
Průměr \bar{x}	48,97	Průměr \bar{x}	42,42	průměr \bar{x}	10,98	průměr \bar{x}	11,45
Směrodatná odchylka s	6,48	Směrodatná odchylka s	7,56	Směrodatná odchylka s	2,44	Směrodatná odchylka s	2,83

Aby byla vyloučena hrubá chyba při měření hodnot, bylo nutné provést testy odlehlých hodnot. Jedná se o Dean-Dixonův test (Q-test) a Grubbsův test.

4.3.1 Dean-Dixonův test (Q-test)

1. Seřazení výsledků měření od nejmenšího po největší: $x_1 < x_2 < \dots < x_{n-1} < x_n$
2. Určení kritéria Q pro minimální a maximální hodnotu:

$$\text{pro } x_1 \text{ vypočteme } Q_1 = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1} \quad (4.1)$$

$$\text{pro } x_n \text{ vypočteme } Q_n = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1} \quad (4.2)$$

Vypočtené hodnoty Q porovnáme s tabelovanou hodnotou Q_α pro daný počet měření, tedy pro danou hodnotu (n) na zvolené hladině významnosti α . Když bude hodnota Q (Q_1 nebo hodnota Q_n) větší nebo rovna kritické hodnotě Q_α , tak se příslušná hodnota x_1 nebo x_n vyloučí ze souboru. Pokud je nějaká hodnota ze souboru vyloučena, je nutné test znovu opakovat pro nově získaný soubor [27,28].

4.3.2 Grubbsův test

1. Seřazení výsledků měření od nejmenšího po největší: $x_1 < x_2 < \dots < x_{n-1} < x_n$
2. Pro minimální a maximální kritérium určíme hodnotu T:

$$\text{pro } x_1 \text{ vypočteme } T_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{s} \cdot \sqrt{\frac{n}{n-1}} \quad (4.3)$$

$$\text{pro } x_n \text{ vypočteme } T_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s} \cdot \sqrt{\frac{n}{n-1}} \quad (4.4)$$

Vypočtené hodnoty T porovnáme s tabelovanou hodnotou T_α pro daný počet měření, tedy pro danou hodnotu (n) na zvolené hladině významnosti α . Když bude hodnota T (T_1 nebo hodnota T_n) větší nebo rovna kritické hodnotě T_α , tak se příslušná hodnota x_1 nebo x_n vyloučí ze souboru. Pokud je nějaká hodnota ze souboru vyloučena, je nutné test znovu opakovat pro nově získaný soubor [27,28].

Zvolena byla hladina významnosti $\alpha = 0,05$. Pro tuto hodnotu a počet měření ($n=15$) je kritická hodnota $Q_\alpha = 0,3389$ a $T_\alpha = 2,549$ [29,30].

Dle vzorců (4.1), (4.2), (4.3), (4.4) byly vypočteny hodnoty T a Q a zapsány do tabulky 11.

Tab. 11 Vypočtené hodnoty testů odlehlých hodnot

	1A	1B	2A	2B
Q₁	0,21	0,00	0,12	0,03
Q₁₅	0,24	0,14	0,00	0,46
T₁	1,90	1,39	1,37	1,35
T₁₅	1,79	1,70	2,19	2,90

Po provedení testů odlehlých hodnot byla vyřazena hodnota $DAS = 19,38 \text{ } [\mu\text{m}]$ ze souboru očkovaných odlitků litých do kovové kokily. Výsledné průměrné hodnoty DAS jsou zobrazeny v tabulce 12.

Tab. 12 Výsledné průměrné hodnoty DAS

	DAS [μm] 1A	DAS [μm] 1B	DAS [μm] 2A	DAS [μm] 2B
Průměr \bar{x}	48,97	42,42	10,98	10,89
Směrodatná odchylka s	6,48	7,56	2,44	1,95

ZÁVĚRY

Cílem této bakalářské práce bylo zpracovat literární rešerši obsahující vliv očkování a rychlosti chladnutí na vzdálenost sekundárních os dendritů a provést experiment včetně vyhodnocení výsledků.

V první části bakalářské práce je rešerše z odborné literatury. Jsou zde popsány slévárenské slitiny hliníku a jejich vlastnosti.

Dále se práce zabývá tuhnutím slitin hliníku po jejich odlití. Je zde popsán vznik dendritické struktury a její popis. V této práci je taktéž uveden princip měření hodnoty DAS, ovlivnění této hodnoty a také vliv této hodnoty na výsledné vlastnosti slitin.

První část také obsahuje popis vlivu očkování na strukturu hliníkových slitin. Jsou zde vypsány jednotlivé očkující prvky a je zde také popsán způsob očkování těmito prvky. Následuje popis modifikace slitin Al-Si. Tato část zahrnuje výpis modifikačních prvků a také popis jejich vlivu na modifikaci.

Druhá část obsahuje popis experimentu. Během experimentu byly odlity 4 odlitky ze slitiny hliníku AlSi10Mg(a). Dva odlitky byly odlity do písku a jeden z těchto odlitků byl naočkován. Další dva odlitky byly odlity do kovové kokily a taktéž jeden z nich byl naočkován. Jako očkovadlo byla použita předslitina AlTi5B1. Z těchto odlitků byly odebrány vzorky pro pozorování jejich mikrostruktury. Pro popis mikrostruktury vzorků byly pořízeny fotografie se zvětšením 200x pro odlitky odlitých do kokil. Vzorky odlitků, které byly odlité do písku, byly nafoceny se zvětšením 100x. Z těchto fotografií byly naměřeny a vypočítány hodnoty DAS.

Průměrná hodnota DAS pro odlitek litý do písku, který nebyl očkován je 48,97 μm se směrodatnou odchylkou 6,48 μm . Pro očkovanou slitinu odlitou do písku je průměrná hodnota DAS 42,42 μm se směrodatnou odchylkou 7,56 μm . Odlitek litý do kovové kokily a nenaočkováný má průměrnou hodnotu DAS 10,98 μm se směrodatnou odchylkou 2,44 μm a odlitek litý do kovové kokily, který byl očkován má průměrnou hodnotu DAS 10,89 μm se směrodatnou odchylkou 1,95 μm . Z těchto vypočtených průměrných hodnot můžeme vyvodit, že odlitky lité do písku mají výrazně větší průměrnou hodnotu DAS než odlitky lité do kovové kokily. Menší hodnota DAS u odlitků litých do kovové kokily je dosažena díky větší rychlosti chladnutí než u odlitků litých do písku. Porovnáním vzdáleností sekundárních os dendritů u očkováných a neočkováných odlitků litých stejným způsobem se prokázalo, že očkování nemá na hodnotu DAS vliv. Očkováním se zmenšila průměrná hodnota DAS o 13,4 % u odlitků odlitých do písku a o 0,8 % u odlitků odlitých do kovové kokily. Avšak vzhledem k hodnotám směrodatných odchylek můžeme toto procentuální snížení průměrných hodnot DAS u očkováných odlitků zanedbat.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
2. *Hliníkové kokilové odlitky* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.heunisch-guss.com/cz/produkty/hlinikove-kokilove-odlitky.html>
3. Historie hliníku. *Alinvest* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.alinvest.cz/hlinik/historie-hliniku>
4. HLINÍK. *Historie chemie* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/hist/chemlat/hlinik.html>
5. Hliník – lehký, moderní a vysoce kvalitní. *Kalzip* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.kalzip.cz/historie-hliniku/>
6. Historie hliníku v kostce. *DC Sloupy* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.dc-sloupy.cz/site/cz/spolecnost/historie-hlinik.html>
7. *Eros Statue, Piccadilly Circus* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.aviewoncities.com/gallery/showpicture.htm?key=kveen1536>
8. SILBERNAGEL, Arnošt. *Nauka o materiálu: struktura a vlastnosti kovových materiálů*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1991, 150 s. ISBN 80-707-8116-5.
9. BOLIBRUCHOVÁ, Dana a Eva TILLOVÁ. *Zlievarenské zliatiny Al-Si*. V Žiline: Žilinská univerzita, 2005. ISBN 80-807-0485-6.
10. GRÍGEROVÁ, Tatiana, Ivan LUKÁČ a Rudolf KOŘENÝ. *Zlievarenstvo neželezných kovov*. Bratislava: Alfa, 1988. Edícia hutníckej literatúry (Alfa). ISBN 063-566-88.
11. MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
12. DORAZIL, Eduard. *Nauka o materiálu II*. 3., nezm. vyd. Brno: VUT, 1979. Učební texty vysokých škol.
13. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
14. VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.

15. HANUMANTHA RAO, D., G. R. N. TAGORE a G. RANGA JANARDHANA. Evolution of Artificial Neural Network (ANN) model for predicting secondary dendrite arm spacing in aluminium alloy casting. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* [online]. 2010, **32**(3) [cit. 2017-05-21]. ISSN 1678-5878. Dostupné z: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-58782010000300011
16. CHO, Jae-Ik, Cheol-Woo KIM, Shuji HANADA, Hiroshi YAMAGATA a Chaoli MA. The Relationship between Dendrite Arm Spacing and Cooling Rate of Al-Si Casting Alloys in High Pressure Die Casting: A multi-refinement modifier. *International Journal of Metalcasting* [online]. 2014, **8**(1), 49-55 [cit. 2017-05-21]. DOI: 10.1007/BF03355571. ISSN 1939-5981. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF03355571>
17. ZHANG, B., M. GARRO a C. TAGLIANO. Dendrite arm spacing in aluminum alloy cylinder heads produced by gravity semi-permanent mold. *Metallurgical science and technology* [online]. 2003, **21**(1), 1-8 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://file.seekpart.com/keywordpdf/2011/3/30/201133012235187.pdf>
18. EL SEBAIE, O., A.M. SAMUEL, F.H. SAMUEL a H.W. DOTY. The effects of mischmetal, cooling rate and heat treatment on the hardness of A319.1, A356.2 and A413.1 Al-Si casting alloys. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2008, **486**(1-2), 241-252 [cit. 2017-05-21]. DOI: 10.1016/j.msea.2007.09.011. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509307016334>
19. KLOCOVÁ, Petra. *Hodnocení poremity u odlitků tlakově litych z Al slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 66s., příloh. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jaroslav Čech, CSc.
20. JEONG, C. Y., C.-S. KANG, J.-I. CHO, I.-H. OH a Y.-C. KIM. Effect of microstructure on mechanical properties for A356 casting alloy. *International Journal of Cast Metals Research* [online]. 2013, **21**(1-4), 193-197 [cit. 2017-05-21]. DOI: 10.1179/136404608X361936. ISSN 1364-0461. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/136404608X361936>
21. ZHANG, Yijie, Shouxun JI a Zhongyun FAN. Improvement of mechanical properties of Al-Si alloy with effective grain refinement by in-situ integrated Al₂Ti₁B-Mg refiner. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2017, **710**, 166-171 [cit. 2017-05-21]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.03.244. ISSN 09258388. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838817310368>

22. BIROL, Yucel. AlB3 master alloy to grain refine AlSi10Mg and AlSi12Cu aluminium foundry alloys. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2012, **513**, 150-153 [cit. 2017-05-21]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2011.10.010. ISSN 09258388. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838811019645>
23. ZHANG, Lili, Hongxiang JIANG, Jiuzhou ZHAO a Jie HE. Microstructure and grain refining efficiency of Al-5Ti-1B master alloys prepared by halide salt route. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2017, **246**(1-2), 205-210 [cit. 2017-05-21]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.03.029. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092401361730122X>
24. PATAKHAM, Ussadawut, Julathep KAJORNCHAIYAKUL, Chaowalit LIMMANEEVICHITR, Hiroshi YAMAGATA a Chaoli MA. Grain refinement mechanism in an Al–Si–Mg alloy with scandium: A multi-refinement modifier. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2012, **542**(1-2), 177-186 [cit. 2017-05-21]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2012.07.018. ISSN 09258388. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838812011784>
25. XU, Cong, Wenlong XIAO, Shuji HANADA, Hiroshi YAMAGATA a Chaoli MA. The effect of scandium addition on microstructure and mechanical properties of Al–Si–Mg alloy: A multi-refinement modifier. *Materials Characterization* [online]. 2015, **110**(1-2), 160-169 [cit. 2017-05-21]. DOI: 10.1016/j.matchar.2015.10.030. ISSN 10445803. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1044580315300334>
26. Ecopress 100. In: *Metalogis* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: http://www.metalogis.com/images/sampledData/Ecopress_100/EPR_100_web.png
27. *Vylučování odlehých výsledků* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <https://web.vscht.cz/~poustkaj/APPP%20Vylucovani%20odlehlych%20vysledku.pdf>
28. *Hodnocení analytických výsledků* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://ach.upol.cz/ucebnice/hodnoceni2.htm>
29. *Critical Values for Grubb's Test* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: https://chem.libretexts.org/Reference/Reference_Tables/Analytic_References/Appendix_07%3A_Critical_Values_for_Grubb%E2%80%99s_Test
30. *Critical Values of Expanded Dixon Outlier Test* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://webpace.ship.edu/pgmarr/Geo441/Tables/Dixon%20Table,%20Expanded.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A ₅	Tažnost	[%]
DAS	Vzdálenost sekundárních větví dendritů	[μm]
HB	Tvrdost podle Brinella	[-]
hm. %	Hmotnostní procenta	[%]
Q	Kritérium pro Dean-Dixnův test	[-]
s	Směrodatná odchylka	[μm]
T	Kritérium pro Grubbsův test	[-]
t _f	Doba tuhnutí odlitku	[s]
\bar{x}	Aritmetický průměr	[μm]
α	Hladina významnosti	[-]
α(Al)	Tuhý roztok hliníku	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady odlitků z hliníkových slitin	10
Obr. 2 Socha Eroze	11
Obr. 3 Binární diagram na bázi hliníku a přísadového prvku s rozdělením slitin hliníku ..	12
Obr. 4 Rovnovážný diagram Al-Si s obrázky mikrostruktur rozdílného obsahu Si	13
Obr. 5 Rovnovážný diagram Al-Mg	15
Obr. 6 Rovnovážný diagram Al-Cu	16
Obr. 7 Rovnovážný diagram Al-Zn	17
Obr. 8 Dendrit	18
Obr. 9 Základní strukturní elementy v podeutektické slitině Al-Si.....	19
Obr. 10 Závislost mechanických vlastností slitin na DAS	20
Obr. 11 Měření DAS	20
Obr. 12 Souvislost morfologie tuhé fáze s velikostí koncentračního přechlazení	21
Obr. 13 Vliv očkovaní na velikost zrn, a) bez očkovačla, b) očkovaní pomocí 0,2 % Al ₅ Ti ₁ B	23
Obr. 14 Nukleace zárodků TiAl ₃	24
Obr. 15 Rozdíl ve velikosti zrna při očkovaní slitiny AlSi10Mg(a) očkovačly AlTi ₅ B ₁ a AlB ₃	25
Obr. 16 Struktura neočkované slitiny vlevo a po přidání 0,8 %Sc vpravo	26
Obr. 17 Vliv modifikace na mechanické vlastnosti slitin Al-Si (1- modifikované slitiny. 2- nemodifikované slitiny)	27
Obr. 18 Odlitek odlitý do písku	32
Obr. 19 Odlitek odlitý do kovové kokily	32
Obr. 20 Elektrická odporová pec	32
Obr. 21 Místo odběru vzorku z odlitku litého do kovové kokily.....	33
Obr. 22 Místo odběru vzorku z odlitku litého do písku	33
Obr. 23 Laboratorní rozbrušovací pila Labotm-3	34
Obr. 24 Lis ECOPRESS100	34
Obr. 25 Mikrostruktura odlitku litého do písku (neočkováno)	35

Obr. 26 Mikrostruktura odlitku litého do písku (očkováno).....	35
Obr. 27 Mikrostruktura odlitku litého do kovové kokily (neočkováno).....	36
Obr. 28 Mikrostruktura odlitku litého do kovové kokily (očkováno).....	36
Obr. 29 Světelný mikroskop MTM 406.....	37

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Minimální mechanické vlastnosti slitin na bázi Al-Si	14
Tab. 2 Minimální mechanické vlastnosti slitin na bázi Al-Mg.....	16
Tab. 3 Minimální mechanické vlastnosti slitin na bázi Al-Cu.....	17
Tab. 4 Chemické složení slitiny AlSi10Mg(a) dané normou.....	30
Tab. 5 Mechanické vlastnosti odděleně odlitých zkušebních těles ze slitin AlSi10Mg(a) litých do pískové formy	30
Tab. 6 Mechanické vlastnosti odděleně litých zkušebních těles ze slitin AlSi10Mg(a) litých do kovové formy	31
Tab. 7 Změřené chemické složení neočkované slitiny AlSi10Mg(a)	31
Tab. 8 Změřené chemické složení očkované slitiny AlSi10Mg(a)	31
Tab. 9 Označení odlitků	31
Tab. 10 Naměřené hodnoty DAS	37
Tab. 11 Vypočtené hodnoty testů odlehlých hodnot.....	38
Tab. 12 Výsledné průměrné hodnoty DAS	39

